



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

ANÁLISE NUMÉRICA DO ESCOAMENTO EM TORNO DE UM
CILINDRO

ADRIANA CORREIA DA SILVA

ORIENTADOR: LINEU JOSÉ PEDROSO, Dr. Ing



MONOGRAFIA DE PROJETO EM ESTRUTURAS
BRASÍLIA/DF: JULHO DE 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE NUMÉRICA DO ESCOAMENTO EM TORNO DE UM CILINDRO

ADRIANA CORREIA DA SILVA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. Dr. Lineu José Pedroso. (ENC-UnB)
(Orientador)

Prof. Dr. Marcus Vinicius Girão de Moraes (ENM-UnB)
(Examinador externo)

Prof. Dr. Lenildo Santos da Silva (ENC-UnB)
(Examinador interno)

BRASÍLIA/DF, 10 DE JULHO DE 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, ADRIANA CORREIA DA

Análise numérica do escoamento em torno de um cilindro [Distrito Federal] 2018.

x, 58p., 210x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Dinâmica dos Fluidos Computacional

2. ANSYS CFX

3. Escoamento Laminar

4. Escoamento Potencial

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Bacharel)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, A.C. (2018). Análise numérica do escoamento em torno de um cilindro. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, x, 58p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Adriana Correia da Silva.

TÍTULO: Análise numérica do escoamento em torno de um cilindro. Monografia.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Adriana Correia da Silva
QE 03 Bloco K Apartamento 207 – Guarã I
CEP: 71.020-003 Brasília – DF – Brasil
e-mail: adrianacorreiads@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Valdice e Juscelino por serem minhas referências, nunca deixando de me incentivar mesmo com os sacrifícios realizados para que o desafio de educar suas filhas fosse superado.

A minha irmã Luciana pelo conforto proporcionado por sua companhia desde a infância.

Aos meus amigos Fernando, Luísa, Sara e Yan pela compreensão e apoio nos momentos complicados, além da amizade que supera o tempo e a distância.

Aos meus amigos José Henrique, Gabriel e Eik pelo companheirismo e estímulo ao meu crescimento pessoal.

A Professora Cláudia pela sua sensibilidade que tornou o período da graduação mais humano.

Ao Professor Lineu pela paciência, humanismo e liberdade concedidos para que encontrasse minha motivação. Provando que ser além de um professor, um educador.

A Universidade de Brasília, não apenas pela oportunidade de obter um diploma, mas por ter me permitido conviver com a beleza da diversidade, proporcionando momentos de reflexões saudáveis e necessários à luta por uma sociedade igualitária.

“Às vezes ouço passar o vento;
e só de ouvir o vento passar,
vale a pena ter nascido”

Fernando Pessoa

RESUMO

Esse trabalho aborda o escoamento laminar em torno de um cilindro. Para a análise da distribuição de esforços gerados no corpo submerso, os coeficientes de arrasto e pressão foram caracterizados. O problema foi modelado no software ANSYS CFX, programa que utiliza a técnica dos volumes finitos capaz de resolver problemas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) onde as soluções puderam ser analisadas de forma qualitativa e quantitativa, graças a sua interface gráfica amigável ao usuário. O programa possibilita a realização de análises paramétricas, como o estudo da influência dos resíduos numéricos e a influência que a proximidade das fronteiras do domínio tem sobre os resultados. Estabelecidos os parâmetros que gerassem o menor esforço computacional, uma análise comparativa com o escoamento potencial foi realizada. Os resultados obtidos apresentaram valores satisfatórios, estando dentro do intervalo da literatura para as condições de escoamento estabelecidas.

Palavras-chave: dinâmica dos fluidos computacional, escoamento laminar, ANSYS CFX, escoamento potencial.

SUMÁRIO

1	GENERALIDADES	1
1.1	INTRODUÇÃO.....	1
1.2	COLOCAÇÃO DO PROBLEMA.....	2
1.3	JUSTIFICATIVA	2
1.4	OBJETIVOS	7
1.4.1	OBJETIVOS GERAIS	7
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.5	METODOLOGIA.....	8
1.6	ABRANGÊNCIAS E LIMITAÇÕES	9
1.7	ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	13
3.1	ESCOAMENTO POTENCIAL EM TORNO DE CILINDROS	13
3.2	GRUPOS ADIMENSIONAIS RELEVANTES	18
3.3	CAMADA LIMITE.....	20
3.4	DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	23
3.4.1	APLICAÇÕES DE CFD	25
3.4.2	METODOLOGIA DE CFD	26
4	ASPECTOS COMPUTACIONAIS E MODELAGEM	28
4.1	ANSYS	28
4.2	MODELAGEM	30
5	RESULTADOS.....	33
5.1.1	CASO 1 – VALIDAÇÃO	33
5.1.2	CASO 2 – INFLUÊNCIA DAS DIMENSÕES DO DOMÍNIO	38
5.1.3	CASO 3 – INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE REYNOLDS	39
6	CONCLUSÕES	46
	ANEXO A.....	51
	ANEXO B	52
	ANEXO C	56
	ANEXO D	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa do Potencial Eólico do Brasil. Fonte: CEPEL.	5
Figura 2 – Metodologia da análise.	8
Figura 3 – Cilindro virtual gerado pela composição de escoamentos. Fonte:Pedroso(1982). .	14
Figura 4 – Escoamento em torno de um cilindro Fonte: Munson (2015).	15
Figura 5 – Comparação entre a distribuição teórica de pressão na superfície de um cilindro e uma distribuição experimental típica. Fonte: Munson (2015).	16
Figura 6 - Variação de C_p na superfície externa do cilindro. Fonte: Kumar et al (1994).	17
Figura 7 – Camada limite, CL, numa placa plana. Fonte: Pereira (2010).	20
Figura 8 – Fluxograma de trabalho do CFX. Fonte: Módulo de ajuda ANSYS v.18.	28
Figura 9 – Elemento tetraédrico adotado. Fonte: Guia do usuário ANSYS.	30
Figura 10 – Faces do elemento tetraédrico. Fonte: Guia do usuário ANSYS.	30
Figura 11 – Condições de contorno impostas.	32
Figura 12 – Parâmetros dimensionais do domínio.	33
Figura 13 – Detalhe da malha não estruturada M1	34
Figura 14 – Detalhe da malha híbrida M2.....	34
Figura 15 – Padrão das linhas de corrente para $Re=40$ na simulação do escoamento laminar em torno de um cilindro circular.	36
Figura 16 – Padrão das linhas de corrente para $Re=40$ na simulação do escoamento laminar em torno de um cilindro circular. Fonte: Pereira (2010).	36
Figura 17 – Escoamento laminar a $Re=1$	39
Figura 18 – Escoamento laminar a $Re=40$	40
Figura 19 – Linha de coleta de resultados na posição ortogonal ao escoamento.	40
Figura 20 - - Linha de coleta de resultados na posição ortogonal ao escoamento.	42
Figura 21 – Variação de C_p obtido para a superfície externa do cilindro.	45

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Regimes de escoamento ao redor de um cilindro circular. Fonte: Khalil (2016)...	21
Tabela 2 – Nós associados do elemento tetraédrico.....	31
Tabela 3 – Propriedades do ar à pressão de 1 atm. Fonte: Çengel (2015).	32
Tabela 4 – Características das malhas usadas.	35
Tabela 5 – Comparação dos valores obtidos do C_D com a literatura.	35
Tabela 6 – Efeitos da distância das fronteiras no valor do coeficiente de arrasto, C_D , para um Reynolds de 40.	38
Tabela 7 – Potência instalada no Brasil segundo a fonte: Junho de 2018. Fonte: ANEEL.	51
Tabela 8 – Comparação da estimativa de evolução da potência instalada em fonte eólica e total no Brasil: Fonte: MME.	51
Tabela 9 – Variação do coeficiente de pressão, C_p , na superfície do cilindro.	58

SIMBOLOGIA

β - ângulo formado a partir do ponto de estagnação frontal.

θ - ângulo formado a partir do ponto de estagnação traseiro.

P - campo de pressão ao redor do corpo

C_D - coeficiente de arrasto

C_L - coeficiente de sustentação

C_p - coeficiente de pressão

u - componente da velocidade na direção x

v - componente da velocidade na direção y

w - componente da velocidade na direção z

v_r - componente radial da velocidade

v_θ - componente tangencial da velocidade

ρ - densidade do fluido

D - diâmetro do cilindro

r - distância ao centro do cilindro

F_D - força de arrasto

F_L - força de sustentação

ψ - função de corrente

K - intensidade da fonte e do sumidouro

Re - número de Reynolds

Φ - potencial de velocidade

P' - pressão modificada

p_s - pressão na superfície do corpo

p_0 - pressão no infinito

U - velocidade no infinito

ν - viscosidade cinemática do fluido

μ - viscosidade dinâmica do fluido

1 GENERALIDADES

1.1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional associado ao aumento da complexidade dos processos necessários a manutenção da sociedade gera uma crescente demanda por energia elétrica. Para suprir essa necessidade, o aumento da oferta deve ser feito de forma sustentável, buscando a redução do uso de fontes poluidoras, como as que se baseiam nos combustíveis fósseis. Logo, é perceptível um movimento de transição para as fontes renováveis de energia, como a solar e a eólica.

No Brasil, a fonte que tem o maior peso na matriz energética é hidroelétrica, dadas as condições favoráveis para sua produção. Embora essa fonte seja considerada firme, uma vez que é capaz de acumular energia quando preciso na forma potencial retendo o volume de água nos reservatórios, seu impacto é grande, devido as grandes área de alagamento necessárias. Assim, busca-se associar essa fonte com outras que possuem maior variação em sua produção de forma que as diferentes fontes possam se complementar. Isso é possível graças ao Sistema Interligado Nacional, o SIN, que permite a cooperação entre as diferentes fontes, permitindo que nos horários de maior aproveitamento dos ventos e do sol, a água dos reservatórios seja poupada, e, usada nos momentos de pico de consumo ou quando as outras fontes estiverem em um momento de menor produção, mantendo sempre o equilíbrio entre geração e consumo.

A busca pela diversificação da matriz energética tem impulsionado um crescimento notável das fontes renováveis, que a cada dia se tornam mais competitivas no mercado. A energia eólica possui forte previsão de crescimento. Isso tem fomentado o desenvolvimento constante de tecnologia e a capacitação de mão de obra para construir e operar os novos empreendimentos.

Com torres cada vez mais altas para o melhor aproveitamento da energia cinética contida no vento, o estudo da interação dessas estruturas flexíveis com o ar em movimento mostra-se crucial para a viabilidade dessa tecnologia. Seja para a criação de pás mais eficientes, capazes de gerar maior potência nas turbinas, seja para o estudo do posicionamento mais eficiente das torres, o entendimento da mecânica dos fluidos é indispensável. Desse modo, uma base sólida da teoria deve ser criada para que se possa aproveitar das poderosas ferramentas que utilizam códigos computacionais para a resolução dos problemas estudados.

Assim, esse trabalho visa ser o ponto de partida para o entendimento global de problemas relacionados à exploração de energia eólica.

Sendo uma base, ele trata do escoamento ainda a baixos valores do número de Reynolds, no intervalo onde o regime de escoamento ainda é laminar.

Por conseguinte, o conceito de parâmetros importantes, como os coeficientes de arrasto, de sustentação e de pressão, é introduzido e seus valores interpretados sobre o ponto de vista de deixar claro seu papel na determinação dos esforços que o escoamento gera na estrutura imersa. Tais parâmetros devem ser validados com os resultados experimentais, de modo que se crie confiança no código adotado para, então, partir para a análise de problemas mais complexos de forma responsável. Esse compromisso deve ser assumido de forma quase cética perante os resultados, onde se tenha consciência de sua sensibilidade perante as variáveis que a modelagem do problema necessita.

1.2 COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

O estudo do escoamento de ar em um aerogerador pode possuir duas abordagens, a análise experimental e a análise numérica. A análise experimental implica a reprodução do problema em modelos reduzidos submetidos a ensaios em túneis de vento. Esse tipo de estudo tem elevado custo e os protótipos adotados geralmente são rígidos, não apresentando similaridade quanto à flexibilidade dos elementos reais. Dessa forma, a análise numérica consegue, por meio da dinâmica dos fluidos computacional (CFD), complementar os resultados experimentais, pois nela, tem-se mais liberdade para a variação de geometria e da realização de estudos paramétricos. Isso pode ser usado para reduzir o número de ensaios experimentais necessários ao estudo, além de validar seus resultados. Assim, deve-se aproveitar de forma responsável a poderosa ferramenta que os códigos de CFD representam atualmente para aprimorar as análises, seja pela parametrização, ou pela melhor interface para a interpretação de resultados.

1.3 JUSTIFICATIVA

Dada a crescente demanda por energia elétrica, novas fontes alternativas aos combustíveis fósseis encontram cada vez mais espaço. No Brasil, 81,4% da energia produzida é oriunda de fontes renováveis. Isso é possível graças à força que a energia hidroelétrica

possui na matriz nacional. Entretanto, busca-se diversificá-la de forma a aproveitar outras fontes abundantes disponíveis no país, como a solar e a eólica de forma a contribuir com a tendência mundial de crescimento na produção de energias renováveis em acordo com os tratados internacionais sobre o clima. A seguir encontra-se um panorama histórico dos tratados sobre que focam o desenvolvimento sustentável, juntamente com um contexto da energia eólica no Brasil.

- **Panorama Político das Energias Renováveis**

Após as crises do petróleo de 1973 e 1979, a discussão sobre a limitação dos combustíveis fósseis tornou-se evidente dada à ameaça a segurança energética relacionada. Somada à preocupação sobre as mudanças climáticas associadas à exploração de fontes não renováveis de energia como o carvão, a energia nuclear, o gás natural ou o óleo, acordos internacionais reforçaram a atenção com as questões sobre o meio ambiente e o esgotamento dos combustíveis fósseis.

Assinado em 1997, o Protocolo de Kyoto prevê que como um dos desafios do século o desenvolvimento e aplicação de tecnologias que permitam o uso de fontes renováveis em grande escala.

A Lei nº 9.478 de 1997 inclui nos objetivos da política energética nacional o desenvolvimento das fontes alternativas de energia e confere ao Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) o dever de rever com frequência as matrizes energéticas das diversas regiões do país, considerando as fontes convencionais e alternativas de energia e as tecnologias disponíveis, e de estabelecer as diretrizes de programas de uso da energia solar, da energia eólica e de outras fontes alternativas (MAUAD et al, 2017).

Criado por meio da Lei nº 10.438 de 2002, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) incentiva o crescimento das fontes alternativas como a eólica, a biomassa e as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), de modo a torná-las mais competitivas no mercado disponibilizando linhas especiais de subsidio de investimentos no Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES).

Em seu documento final, “O Futuro que Queremos”, a Rio +20 ressalta o esforço conjunto para o incentivo às energias renováveis, buscando o a economia verde baseada no desenvolvimento sustentável.

Acordo de Paris, aprovado por 195 países na 21ª Conferência das Partes (COP21), busca o desenvolvimento sustentável por meio da redução das emissões de gases do efeito estufa. Para isso, o Brasil se comprometeu a aumentar a participação das energias renováveis

que excluem a hidroelétrica na sua matriz energética nacional em aproximadamente 18% até 2030.

O sétimo objetivo para o desenvolvimento sustentável está entre os dezessete propostos pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), reconhecendo a importância e traçando metas focadas na transição energética de fontes não renováveis e poluidoras, para fontes renováveis limpas, visando a acessibilidade de pessoas e países mais vulneráveis.

- **Energia eólica**

O estudo sobre o potencial eólico brasileiro para aproveitamento energético tem sido realizado desde os anos de 1970, onde o Instituto de Atividades Espaciais, no Centro Técnico Aeroespacial processou dados anemométricos medidos em aeroportos brasileiros e encontrou, entre as maiores velocidades médias anuais, valores da ordem de 4m/s a 10m/s. Esses valores já traziam um indicativo do potencial de geração distribuída por meio de máquinas de pequeno porte para o litoral da região Nordeste e o Arquipélago de Fernando de Noronha. Em 1979, uma parceria entre a Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS) e o Conselho Universitário da Pontifícia Universidade Católica (PUC), iniciou um extenso estudo meteorológico que resultou no primeiro “Atlas do Potencial Eólico Nacional”. Porém, os estudos realizados até o final da década de 1980 foram prejudicados pela falta de representatividade dos registros de dados anemométricos realizados a uma altura de 10m, que são mascarados pela rugosidade do terreno e obstáculos próximos aos sensores de velocidade do vento (anemômetros). Com a instalação das primeiras usinas eólicas no Brasil, no final da década de 1990, iniciaram as primeiras medições anemométricas em alturas entre 30m e 50m. Em 2001, foi publicada pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), vinculado a Eletrobrás, o Mapa do Potencial Eólico do Brasil baseado em dados anemométricos realizados a uma altura de 50m, como mostra a Figura 1.

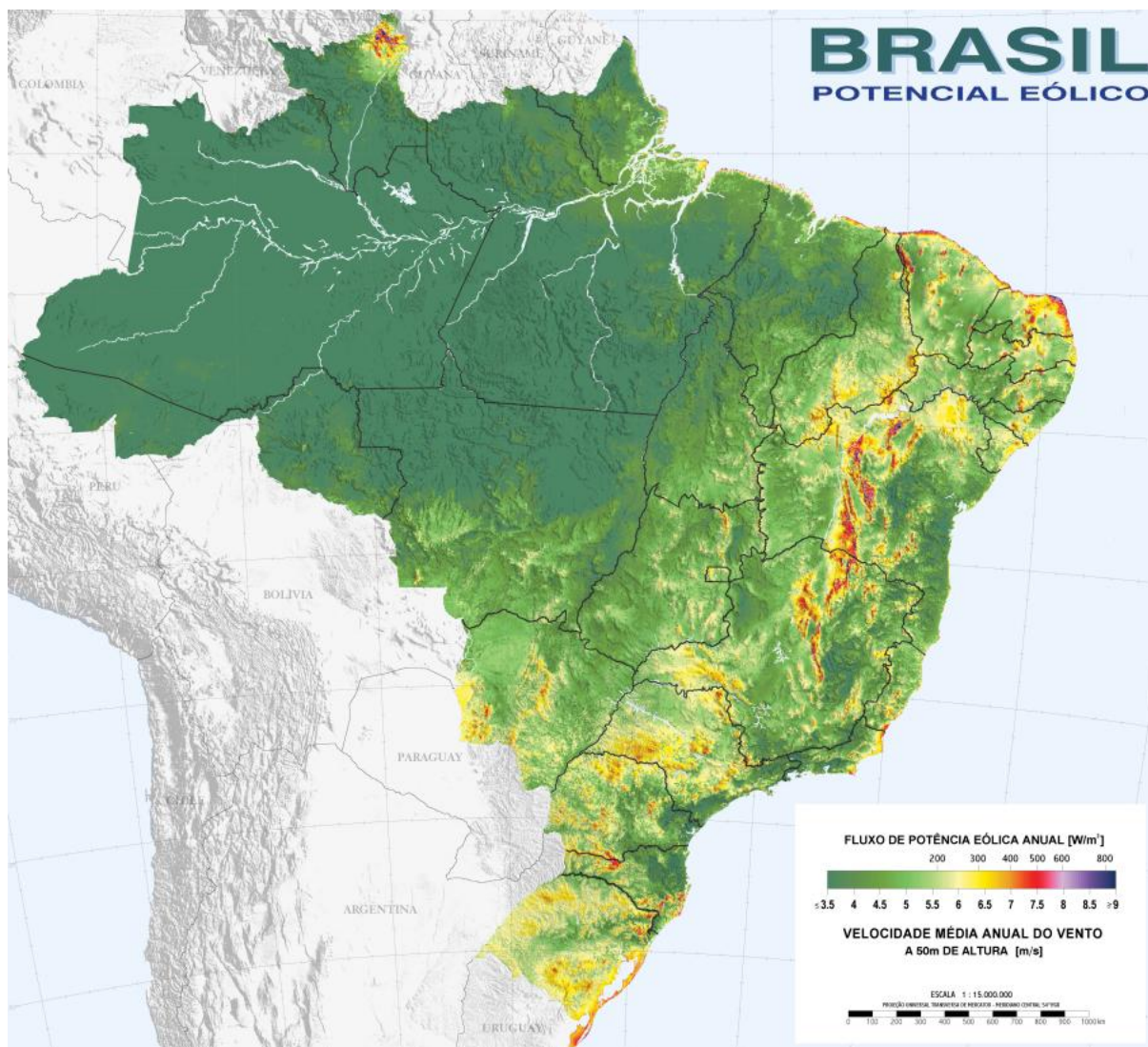


Figura 1 – Mapa do Potencial Eólico do Brasil. Fonte: CEPEL.

No Atlas do Potencial Eólico Brasileiro de 2001, havia um indicativo de que o potencial eólico nacional fosse de 143GW, considerando torres de até 50m de altura, equivalente a dez vezes a capacidade da Usina Hidrelétrica de Itaipu, que tem potência de 14 GW. Entretanto, com a expansão do setor, boa parte dos estados brasileiros está revendo o seu potencial para torres de 120m ou mais. Assim, segundo o Ministério de Minas e Energia, a previsão de que o potencial eólico brasileiro chegue a 350GW.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em junho de 2018, a matriz de energia elétrica brasileira era composta por 78% de energias renováveis, sendo a energia eólica responsável por 7,68% da potência instalada, como mostra o Gráfico 1. Esse valor equivale a 12,9 GW e representa 9,02% de aproveitamento do potencial eólico indicado pelo Atlas de 2001. Ver também a respectiva tabela no Anexo A.

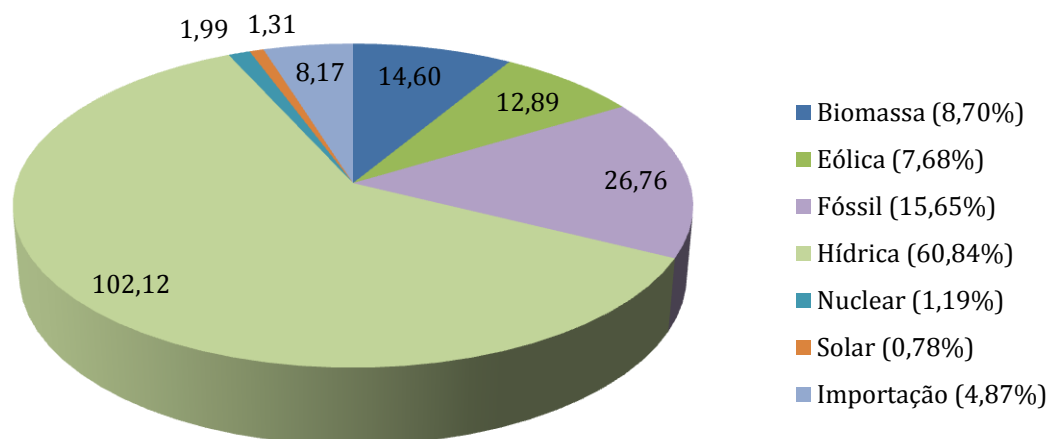


Gráfico 1 – Potência instalada em GW por fonte na matriz de energia elétrica brasileira em Junho de 2018. Fonte: ANEEL.

O atual Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE2026, publicado em dezembro de 2017 pela Empresa de Pesquisa Energéticas (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), indica que a capacidade instalada eólica brasileira chegue a 28,5 GW em 2026, respondendo por 13,4% da produção de energia da total para o ano, e a uma expansão média anual de 1,8 GW, como indicado no Gráfico 2. Ver também a respectiva tabela no Anexo A.

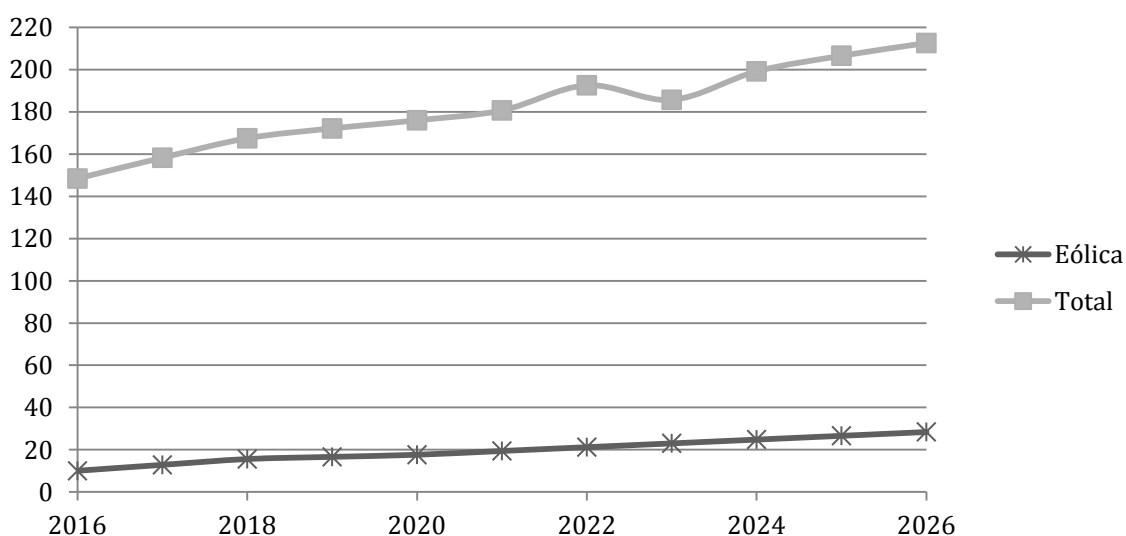


Gráfico 2 – Previsão da capacidade instalada em GW pela fonte eólica com a total no Brasil ao longo dos anos. Fonte: MME.

Nota-se, que em menos de uma década contada a partir da data de apresentação do presente trabalho, a matriz eólica nacional dobrará de capacidade, demandando a formação de mão de obra qualificada não apenas para a execução dos novos empreendimentos, como também comprometida com o desenvolvimento tecnológico, aumento da competitividade brasileira no mercado internacional.

Assim, a motivação pessoal desse trabalho é dar o primeiro passo no entendimento de problemas relacionados ao fornecimento de energia a partir da matriz eólica.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVOS GERAIS

Esse trabalho possui os seguintes objetivos gerais:

- Estabelecer uma base sólida em mecânica dos fluidos que sirva como ponto de partida para o estudo de fenômenos mais complexos no futuro; e
- Gerar material introdutório para a aplicação do software ANSYS CFX em análises de problemas de dinâmica dos fluidos computacional.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, esse trabalho tem:

- Determinar o tipo de malha mais adequado ao problema em estudo;
- Definir o valor aceitável do erro dos resultados de forma a reduzir o esforço computacional;
- Determinar as dimensões mínimas que o domínio necessita possuir para que suas fronteiras não interfiram no valor dos resultados;
- Modelar numericamente o escoamento em torno de um cilindro para diferentes valores do número de Reynolds;
- Avaliar a influência do número de Reynolds no valor do coeficiente de arrasto do cilindro; e
- Observar a perda de energia no escoamento em comparação com a teoria do fluido ideal.

1.5 METODOLOGIA

Dada à complexibilidade do problema do escoamento em torno de uma torre eólica, ele foi dividido, Figura 2 (a), e, nesse trabalho, apenas uma faixa de escoamento em torno do fuste da torre é analisada. Para isso, o diâmetro do cilindro imerso no escoamento será considerado constante, Figura 2 (b).

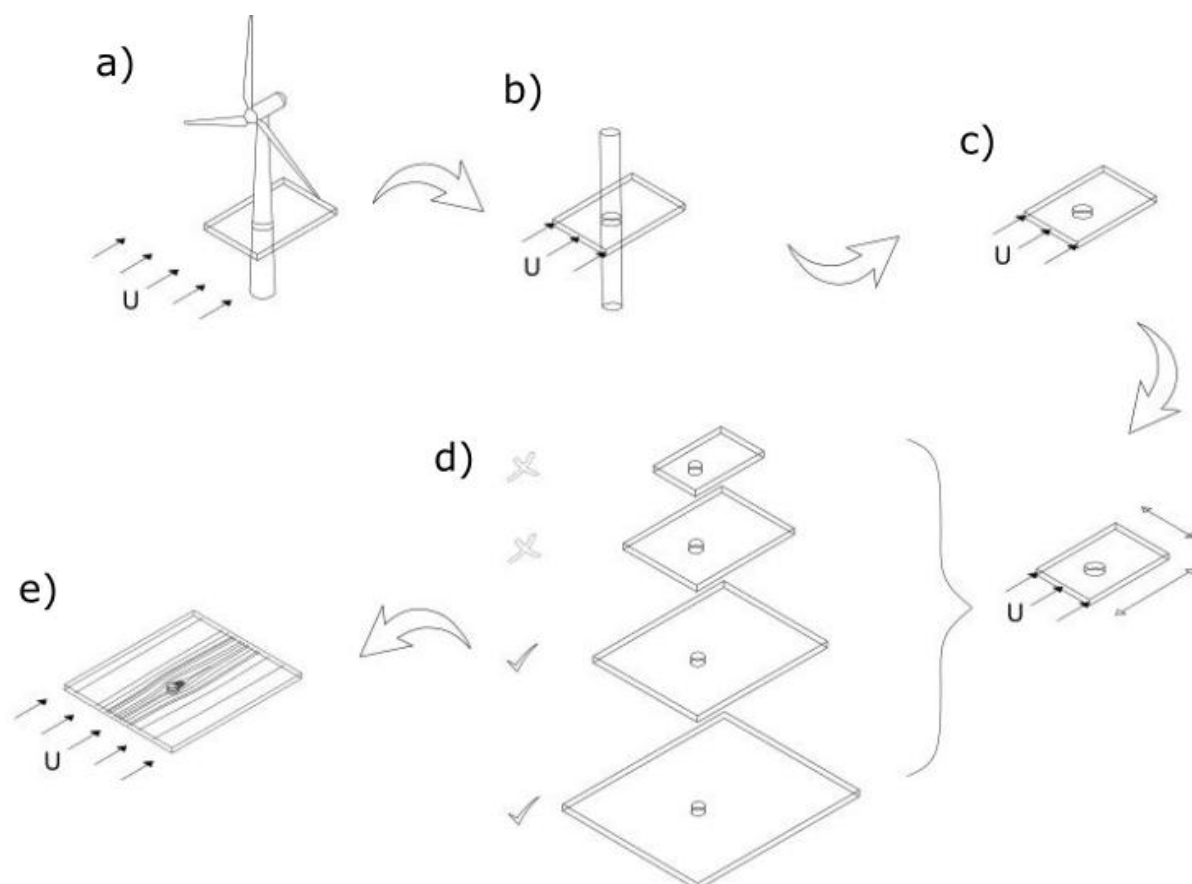


Figura 2 – Metodologia da análise.

Definido o domínio, Figura 2 (c), será feita a validação do modelo criado para o escoamento em torno de um cilindro circular com resultados encontrados na literatura. Por seguinte, será feita uma análise do máximo erro permitido para a análise, sendo essa etapa controlada pelo valor dos resíduos das equações governamentais, de forma a poupar o esforço computacional. Assim, também para poupar tempo de processamento e tornar o estudo mais eficiente, será realizado um estudo da influência que a proximidade das fronteiras do domínio possui na solução do problema, variando seu tamanho até ser encontrado as dimensões do domínio as quais não interfiram mais nos resultados, Figura 2 (d). Calibrados tais parâmetros, serão observados e discutidos os resultados obtidos, Figura 2 (e).

1.6 ABRANGÊNCIAS E LIMITAÇÕES

O presente estudo abrangerá:

- Número de Reynolds de 40;
- Estrutura rígida;
- Fluxo laminar; e
- Modelagem numérica do escoamento em torno de cilindros.

Como limitações o estudo apresentará:

- Escoamento incompressível;
- Escoamento permanente;
- Fluido como ar a temperatura de 25°C; e
- Fluido newtoniano.

1.7 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

No capítulo 2 é realizada uma breve revisão bibliográfica sobre escoamento em torno de cilindros, sendo focado os trabalhos que abordam o escoamento a baixo valor do número de Reynolds.

No capítulo 3 inicia-se com uma rápida fundamentação teórica sobre o escoamento potencial, dito de um fluido ideal, e as razões pelas quais ele é hipotético, apresentando divergências dos resultados obtidos experimentalmente para o problema. O capítulo segue abordando a metodologia empregada nos códigos de CFD, suas aplicações e as equações usadas para solucionar os problemas estudados.

O capítulo 4 traz uma introdução ao software ANSYS, utilizado nas análises desse trabalho, assim como alguns parâmetros da modelagem do problema com o tipo de elemento e a malha adotada.

No capítulo 5 encontram-se os resultados obtidos. Inicialmente validando o modelo com resultados encontrados na literatura e, por conseguinte, é apresentada a análise de resíduos das soluções, assim como a influência que a distância das fronteiras do domínio possui nos resultados, que são então interpretados.

O capítulo 6 relata as conclusões obtidas no estudo do problema, assim como a perspectiva de continuidade do presente trabalho.

Os anexos vem de forma a detalhar e complementar o conteúdo apresentado no trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Kumar et al (1994) estudou as tensões e as deformações de um cilindro estacionário imerso em um escoamento de um fluido ideal adotando técnicas numéricas. A distribuição de tensões Airy, as condições de contorno e aproximação da série de Fourier para a solução da distribuição de tensões foram analisados para desenvolver as equações para o cálculo das tensões e das deformações. Foi observado que os valores mínimos e máximos das tensões foram próximos aos esperados de um cilindro com distribuição uniforme de pressão.

Park (2000) investigou de forma experimental o escoamento ao redor de cilindros com uma das bordas livres variando a relação comprimento/diâmetro do cilindro a um número de Reynolds de 20000. A velocidade do fluido após o cilindro e a distribuição de pressões em torno do dele foram analisados. Seus resultados mostram que à medida que se aproxima da base do cilindro, os resultados se aproximam do escoamento bidimensional e, nas proximidades da borda livre, a média da distribuição de pressão sobre o cilindro sofre uma redução após a separação do escoamento em comparação com os valores obtidos nas proximidades da base.

Carvalho (2003) apresenta em sua dissertação um estudo experimental do escoamento em torno de um cilindro rotativo para números de Reynolds inferiores a 10^3 . Nela, foram observadas a influência do número de Reynolds e da velocidade de rotação. Técnicas de visualização de escoamento foram empregadas na análise quantitativa do escoamento e no auxílio do posicionamento correto dos anemômetros. Esses foram utilizados em conjunto com a técnica de contagem fotográfica na obtenção da frequência de emissão dos vórtices. Seus resultados mostraram que para toda a faixa de Reynolds analisada, a rotação do cilindro possui forte influência na formação da esteira, chegando a inibir a emissão de vórtices para valores de rotação específica superiores a 2.

Nidhul et al (2014) analisou a influência que as dimensões de um domínio retangular tinham sobre os resultados de um escoamento sobre um cilindro retangular a um baixo número de Reynolds. No trabalho, foram modelados escoamentos bidimensionais, permanentes e incompressíveis e resolvidos numericamente usando o ANSYS FLUENT. A análise foi feita de forma a obter as dimensões de domínio que tornassem os resultados independentes de seus valores, de forma a otimizar a análise poupando esforço computacional. Para as dimensões experimentadas pelos autores, obteve-se a convergência de resultados para um domínio com o padrão 15D para a região a montante e lateral do cilindro,

e $18D$ para a região a jusante do cilindro, sendo, D , o diâmetro adotado. O padrão usado foi adotado no presente trabalho e ilustra o caso 2 do item 5.1.2 desse trabalho.

Com o objetivo de avaliar o comportamento fluidodinâmico do ar em baixas velocidades ao redor de um cilindro, Vasconcellos et al (2014) realizou uma análise numérica para o caso realizada pelo software ANSYS CFX para duas velocidades de rotação do cilindro. De forma comparativa, foram observados maiores velocidades e maiores gradientes de pressão para as maiores rotações. Sendo notados gradientes favoráveis de pressão a montante do cilindro e, gradientes desfavoráveis a jusante, causando a separação do escoamento e a formação de esteira a jusante do cilindro.

Nascimento et al (2014) valida o método Pseudoespectral de Fourier para um escoamento incompressível ao redor de um cilindro circular fixo com valor para o número de Reynolds de 100 e estuda a sensibilidade da força de arrasto e sustentação a variações de resolução da malha.

Khalil (2016) investigou o problema do escoamento uniforme ao redor de um cilindro circular submerso através de um modelo numérico viscoso implementado no software StarCCM+. Em seu trabalho, foi investigado o caso particular de escoamento uniforme com número de Reynolds entre 100 e 1000. A autora ressalta que para o estudo do ponto de separação do escoamento, deve-se atentar para o refinamento da malha ao redor da parede do cilindro e na região de esteira. Também foi observada em seu trabalho a tolerância mínima necessária para a convergência dos resultados, sem que os resultados sofressem interferência do número de interações necessárias por passo de tempo. Notou-se que com o maior refinamento da malha, mantendo-se o mesmo critério de parada, o número de interações diminuía para a convergência dos resultados, indicando que para menores elementos de malha, os resultados convergem mais rapidamente.

O Grupo de Dinâmica e Fluido - Estrutura (GDFE) da Universidade de Brasília tem realizado ao longo dos últimos anos várias pesquisas, atividades e publicações no domínio da interação fluido estrutura e estudos afins, dentre os quais se mencionam os trabalhos realizados por Pedroso (1982), Pedroso (1997), Pedroso (2003), Ferreira (2012), Santos (2017) e Pedroso (2018).

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Um dos casos mais clássicos e estudados na mecânica dos fluidos é o do escoamento em torno de um cilindro. Nele, o corpo cilíndrico encontra-se imerso no fluido que o circunda, sendo assim considerado um escoamento externo, onde, por meio de diferentes abordagens, fenômenos complexos podem ser observados, tais como os efeitos viscosos localizados próximos à superfície, inerentes à camada limite e também a região de esteira formada à jusante do escoamento.

Essa atenção tem sido dada pela frequência com que esse tipo de escoamento ocorre na natureza, podendo representar diversos problemas, como pilares de pontes, plataformas *offshore*, edificações, chaminés, árvores e, como é a motivação pessoal do presente trabalho, fustes de torres de aerogeradores.

3.1 ESCOAMENTO POTENCIAL EM TORNO DE CILINDROS

Essa seção é baseada nos livros de Çengel (2015), Munson (2015) e na dissertação de mestrado de Pereira (2010).

Graças à linearidade presente na equação de Laplace, é possível criar novas soluções por meio de suas soluções já existentes através da superposição de efeitos.

Assim, para reproduzir um escoamento em torno de um cilindro virtual, pode-se somar os efeitos de uma corrente uniforme com os de um dipolo, que por si só já é resultante da combinação dos efeitos de uma fonte e com os de um sumidouro de intensidade, K , iguais e posicionados a uma distância próxima de zero.

Para essa combinação de efeitos produz a função de corrente, ψ , e o potencial de velocidade, Φ , representados pelas equações 3.1 e 3.2 respectivamente.

$$\Psi = Ur \sin \theta - \frac{K \sin \theta}{r} \quad (3.1)$$

$$\Phi = Ur \cos \theta - \frac{K \cos \theta}{r} \quad (3.2)$$

onde r representa a distância do centro do cilindro, U , a velocidade em um ponto afastado da região de influência que presença do cilindro gera, θ , o ângulo formado a partir da parte traseira do cilindro.

Para garantir que as equações representem o escoamento em torno de um cilindro, é preciso garantir que própria superfície do cilindro represente uma fronteira, podendo ser reproduzida através de uma linha de corrente, uma vez que elas não podem se cruzar. Dessa forma, a linha que representa a superfície do cilindro forma uma parede sólida para as linhas adjacentes e deve ser constante em torno do cilindro que se deseja modelar. Fazendo, $\Psi = 0$ para $r = R$, conforme a Figura 3, é obtido o valor de intensidade de $K = UR^2$. Com isso, pode-se reescrever a função de corrente e o potencial de velocidade com as equações 3.3 e 3.4 respectivamente.

$$\Psi = Ur \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \sin \theta \quad (3.3)$$

$$\Phi = Ur \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \cos \theta \quad (3.4)$$

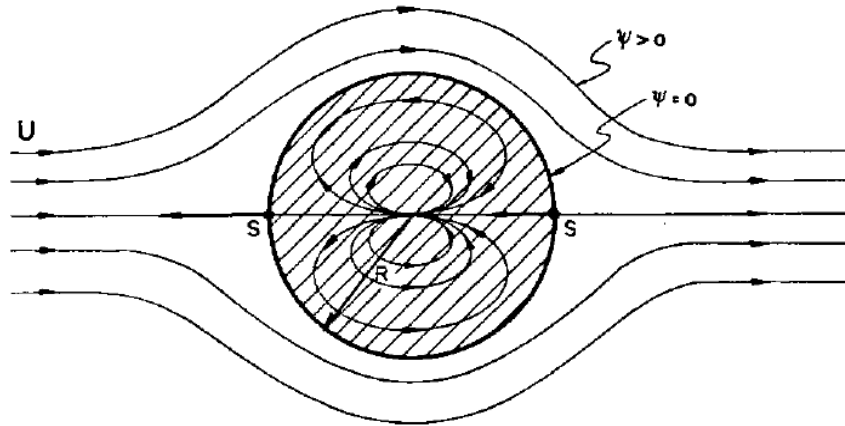


Figura 3 – Cilindro virtual gerado pela composição de escoamentos. Fonte:Pedroso(1982).

Diferenciando as funções acima, é possível obter a componente radial, v_r , e tangencial, v_θ , de velocidade em todos os pontos do escoamento:

$$v_r = \frac{\partial \Phi}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = U \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \cos \theta \quad (3.5)$$

$$v_\theta = \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = -\frac{\partial \Psi}{\partial r} = -U \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \sin \theta \quad (3.6)$$

As equações 3.5 e 3.6 mostram que a velocidade radial do escoamento é nula na superfície do cilindro ($v_r = 0$ em $r = R$) e que, neste local, a velocidade tangencial na superfície do cilindro, $v_{\theta s}$, vale:

$$v_{\theta s} = -2U \sin \theta \quad (3.7)$$

Este resultado mostra que os maiores valores de velocidade ocorrem em $\theta = \pm \pi/2$ e o módulo da velocidade nestes pontos é igual a $2U$. A Figura 4 mostra a distribuição de velocidade ao longo da linha vertical que passa pelo centro do cilindro.

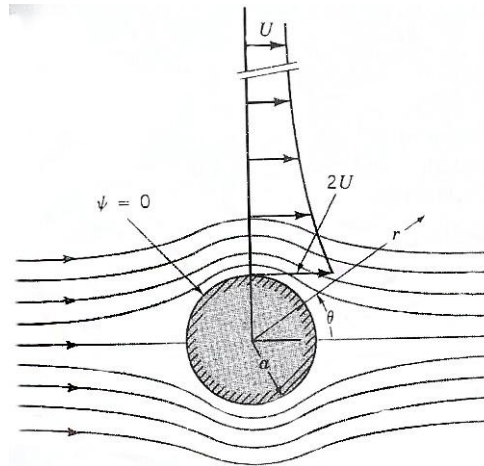


Figura 4 – Escoamento em torno de um cilindro Fonte: Munson (2015).

Desprezando as variações de elevação, é possível usar a equação de Bernoulli para escoamentos irrotacionais, equação 3.8, de modo a se obter a distribuição de pressão na superfície do cilindro.

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho U^2 = p_s + \frac{1}{2} \rho v_{\theta s}^2 \quad (3.8)$$

sendo p_0 a pressão em um ponto afastado da região de influência do cilindro e p_s a pressão em sua superfície.

Aplicando a equação 3.7, a pressão na superfície pode ser expressa por:

$$p_s = p_0 + \frac{1}{2} \rho U^2 (1 - 4 \sin^2 \theta) \quad (3.9)$$

Assim, é possível representar a razão existente entre diferença de pressão estática e a pressão dinâmica do escoamento através do coeficiente de pressão, C_p , dado por:

$$C_p = \frac{p_s - p_0}{\frac{1}{2} \rho U^2} = 1 - 4 \sin^2 \beta \quad (3.10)$$

Onde o ângulo β é medido a partir da frente do cilindro, obtido por meio da transformação $\beta = \pi - \theta$.

A Figura 5 mostra a comparação entre essa distribuição teórica de pressão com a distribuição típica obtida por via experimental. Por ser simétrica em relação ao eixo paralelo ao sentido do escoamento, a distribuição teórica de pressão pode ser replicada para a metade inferior do cilindro.

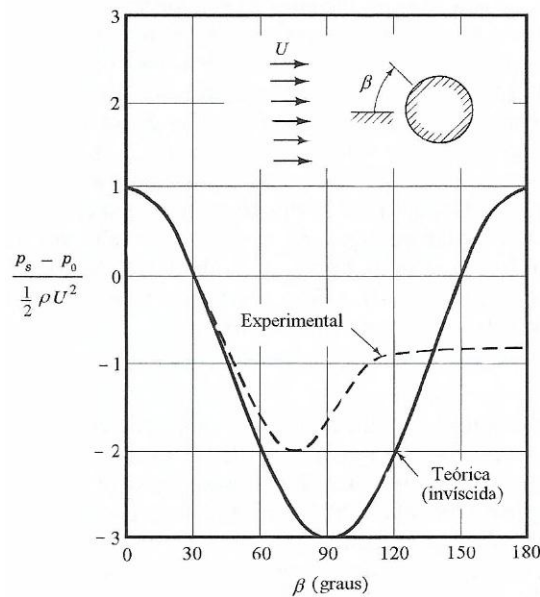


Figura 5 – Comparação entre a distribuição teórica de pressão na superfície de um cilindro e uma distribuição experimental típica. Fonte: Munson (2015).

A Figura 6 mostra a representação da distribuição de pressão obtida no escoamento potencial por meio do coeficiente de pressão plotado em coordenadas polares.

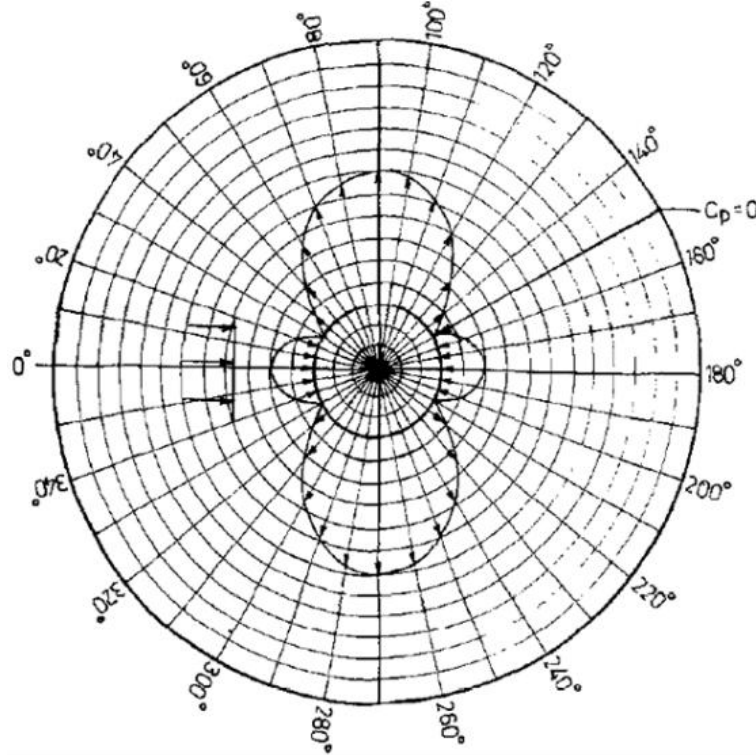


Figura 6 - Variação de C_p na superfície externa do cilindro. Fonte: Kumar et al (1994).

No escoamento potencial, a força resultante é dada pela integração do campo de pressão atuante no corpo. Sua resultante é dividida entre a força paralela ao sentido do escoamento, chamada de força de arrasto, F_D , e a força perpendicular ao escoamento, conhecida como força de sustentação, F_L , indicadas por:

$$F_D = \int_A (-P \cos \beta) dA \quad (3.11)$$

$$F_L = \int_A (-P \sin \beta) dA \quad (3.12)$$

Da simetria do campo de pressões em torno do cilindro no escoamento potencial, supõe-se que a resultante das forças atuantes em sua superfície seja nula, como é demonstrado no ANEXO B. Assim, em 1752, foi enunciado o famoso paradoxo de d'Alembert:

Paradoxo de d'Alembert: “Com a aproximação do escoamento potencial, a força de arrasto aerodinâmica sobre qualquer corpo sem sustentação de qualquer forma imerso em uma corrente uniforme é zero.”.

Sabe-se dos resultados experimentais que em há uma força resultante em corpos submersos em correntes uniformes. Essa força surge por conta da não recuperação da pressão na parte traseira do corpo, gerando um desequilíbrio das forças de pressão. Além disso, ela também possui uma parcela não considerada no escoamento potencial, resultante da viscosidade dos fluidos reais, que gera tensões de cisalhamento na superfície do corpo.

Dessa forma, no escoamento potencial adota-se a hipótese de que a pressão é totalmente recuperada após do ponto de estagnação à jusante do corpo, o que equilibra a parcela equivalente aos esforços de pressão. Além disso, no escoamento potencial não é satisfeita a condição de não escorregamento da superfície, o que também anula os esforços de cisalhamento gerados pela diferença de velocidade entre as linhas de fluxo a partir da superfície do cilindro.

Através dessa divergência, é possível explicar a variação entre as distribuições de pressão teórica e experimental da Figura 5. Na região frontal do cilindro, em $\beta = 0^\circ$ está o primeiro ponto de estagnação, onde o fluido desacelera para a velocidade zero e a pressão chega ao seu valor máximo, dado que a pressão dinâmica total do fluido é sentida como uma pressão estática, que resulta no valor de $P = p_0 + 1/2 \rho U^2$. Nesse ponto, o valor de C_p é 1. Movendo-se a jusante ao longo da superfície do corpo a pressão cai, entrando na zona onde C_p assume valores negativos, pois p_s é menor que p_0 chegando até o valor mínimo em $\beta = 90^\circ$, como mostra a Figura 6, onde, segundo a equação 3.7, a velocidade assume o valor $v_{\theta s} = -2U$. Além desse ponto, em um escoamento real, a pressão recupera-se lentamente, porém, nunca volta a seu valor inicial, levando ao arrasto de pressão resultante já discutido.

3.2 GRUPOS ADIMENSIONAIS RELEVANTES

Por dependerem de parâmetros como a densidade do fluido, ρ , velocidade a montante, U , e da forma, tamanho e orientação do corpo, torna-se não prático mensurar os

valores das forças de arrasto e sustentação. Dessa forma, prefere-se trabalhar com os coeficientes adimensionais equivalentes, C_D e C_L como seguem:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (3.13)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (3.14)$$

onde o valor de A pode variar entre a área frontal do corpo, para o caso do coeficiente de arrasto, e a área planiforme, para o coeficiente de sustentação. O termo $\frac{1}{2}\rho U^2$ é referente à pressão dinâmica, fazendo com que os coeficientes sejam uma relação entre suas respectivas forças com a pressão dinâmica.

Outro parâmetro adimensional importante na mecânica dos fluidos é o número de Reynolds (Re), que relaciona as forças de inércia com as forças viscosas do fluido:

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (3.15)$$

sendo D o diâmetro do cilindro submerso e, μ , a viscosidade dinâmica do fluido.

Ele é um parâmetro chave na determinação do regime em que o escoamento se encontra. Com número de Reynolds grandes, as forças inerciais, que são proporcionais à densidade do fluido e ao quadrado de sua velocidade, são grandes com relação às forças viscosas. Portanto, as forças viscosas não podem evitar as flutuações aleatórias e rápidas do fluido, gerando um escoamento turbulento. Com número de Reynolds pequenos, as forças viscosas são suficientemente grandes para suprimir essas flutuações e manter o fluido, gerando um escoamento laminar.

3.3 CAMADA LIMITE

Dada a existência da viscosidade nos fluidos reais, é observado um comportamento divergente ao da teoria do escoamento potencial nas proximidades da superfície dos corpos. Nessa região, além dos efeitos de inércia, os efeitos viscosos também se mostram importantes, de forma que o valor do número de Reynolds é significativo da caracterização de seu comportamento. Dessa forma, essa região deve ser estudada de forma separada ao restante do escoamento.

Na camada limite, o escoamento pode ser caracterizado como laminar ou como turbulento, não existindo um número de Reynolds que caracterize essa transição, PEREIRA (2010). Da Figura 7, observa-se o crescimento qualitativo da camada limite sobre uma placa plana, de forma que as partículas do fluido em contato com a superfície do corpo adquirem a sua velocidade como resultado da condição de não escorregamento.

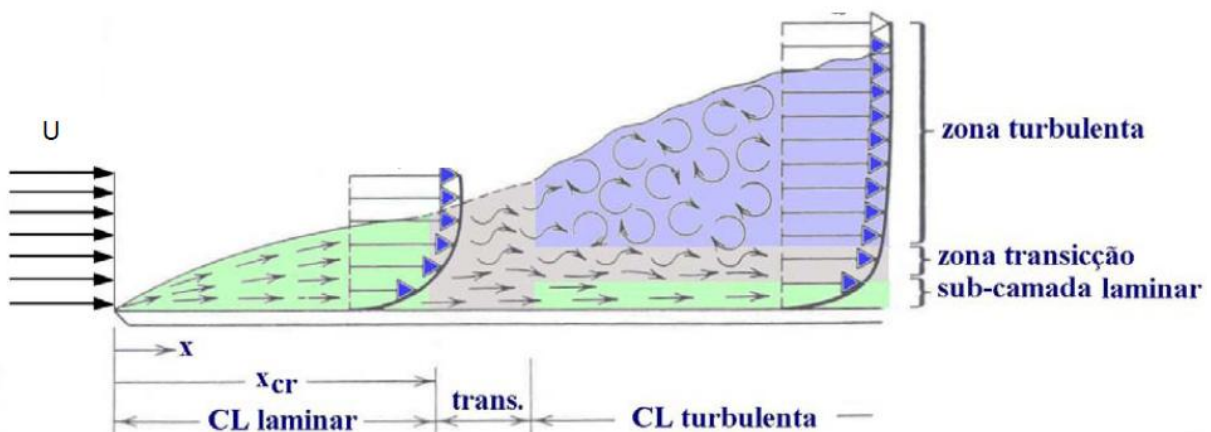






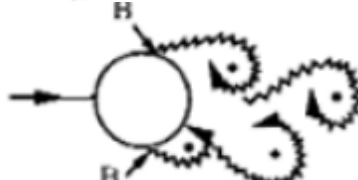




Figura 7 – Camada limite, CL, numa placa plana. Fonte: Pereira (2010).

Retomando os conceitos discutidos no item 3.1 sobre variação da pressão sobre o corpo, sabe-se que na região onde a pressão é retomada, pode ocorrer a separação do escoamento, pois a camada limite turbulenta cresce mais rapidamente que a laminar, provocando um leve deslocamento das linhas de corrente.

Assim, diversos fenômenos podem ocorrer no escoamento em torno de um cilindro com número de Reynolds crescente, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Regimes de escoamento ao redor de um cilindro circular. Fonte: Khalil (2016).

	a) $Re < 5$ Escoamento sem separação.
	b) $5 < Re < 40$ Escoamento com par fixo e simétrico de vórtices.
	c) $40 < Re < 200$ Esteira laminar de vórtices.
	d) $200 < Re < 300$ Transição para turbulência na esteira.
	e) $300 < Re < 3 \times 10^5$ Regime Subcrítico. Esteira completamente turbulenta. A indica os pontos de separação do escoamento laminar.
	f) $3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$ Regime crítico. A indica os pontos de separação do escoamento laminar e B o ponto de separação turbulento, porém com camada limite laminar.
	g) $3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$ Regime supercrítico. B indica o ponto de separação turbulento com camada limite parcialmente laminar e parcialmente turbulenta.
	h) $1.5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$ Regime de transição. C indica a camada limite completamente turbulenta em um lado do cilindro.
	i) $4 \times 10^6 > Re$ Regime transcrítico. C indica a camada limite completamente turbulenta em ambos os lados.

A norma brasileira de vento, NBR 6123:2013, fornece valores de coeficiente de pressão para a obtenção das pressões externas em estruturas cilíndricas para valores de número de Reynolds acima de $4,2 \times 10^5$, ou seja, onde o fluxo já esteja no regime supercrítico segundo a Tabela 1.

Tomando uma velocidade típica de 10m/s, onde já se discute a viabilidade da exploração eólica, e um diâmetro médio de 3,5 m, comum em torres de aerogeradores comerciais, são obtidos valores do número de Reynolds da ordem de 3×10^6 a propriedades do ar a uma temperatura de 25°C, posicionando a análise na faixa onde o regime é de transição, Tabela 1 (h) .

Dados os efeitos observados na Tabela 1, é possível notar a variação do coeficiente de arrasto obtida experimentalmente em função do número de Reynolds no Gráfico 3, onde os valores de coeficiente de pressão são elevados para baixo valor do número de Reynolds. A medida que o escoamento tende a se tornar turbulento, seu valor sofre uma estabilização, com posterior queda na faixa entre $10^5 < Re < 10^6$.

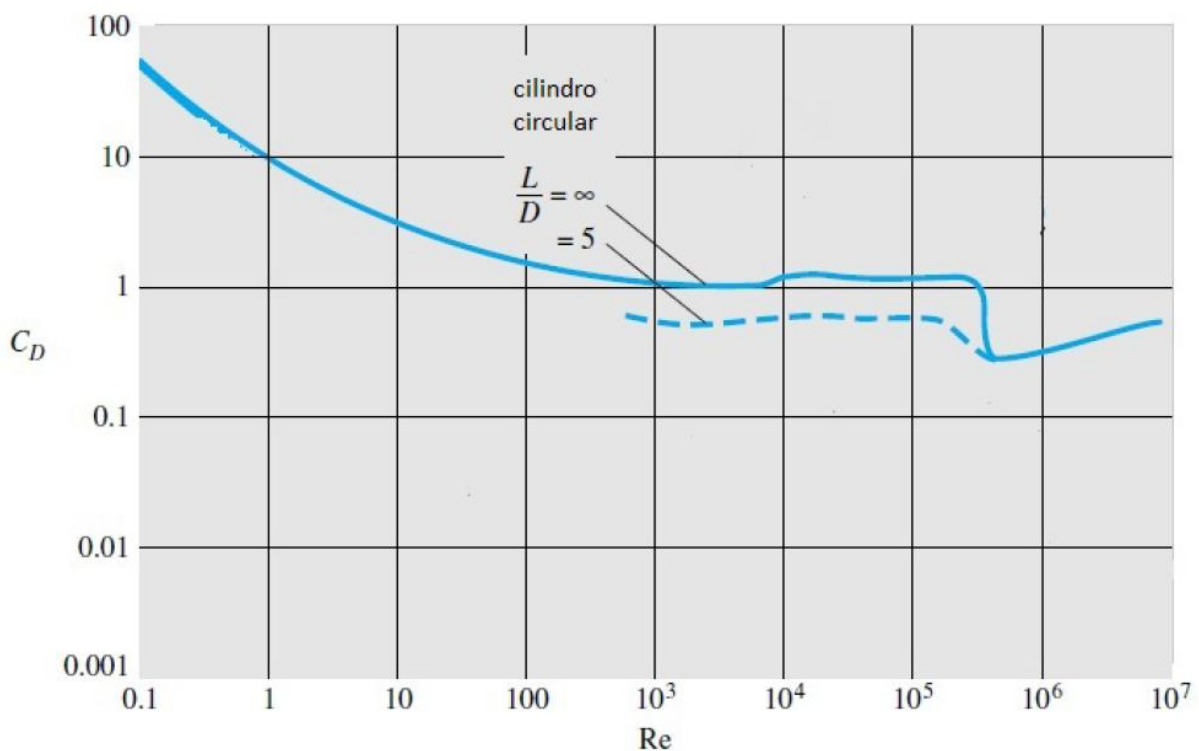


Gráfico 3– Coeficiente de arrasto para um cilindro circular liso em função do número de Reynolds. Fonte: Pereira (2010).

3.4 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

Essa seção é baseada no livro de Çengel (2015) juntamente com o módulo de ajuda do ANSYS.

Computadores têm sido usados para resolver problemas de escoamento de fluidos por muitos anos. A partir de meados da década de 1970, a complexa matemática necessária para generalizar os algoritmos começou a ser entendida e os programas que resolviam problemas gerais de dinâmica dos fluidos computacional, CFD, foram desenvolvidos. Esses começaram a aparecer no início dos anos 80 e ainda exigiam computadores muito poderosos, bem como um conhecimento profundo da dinâmica dos fluidos e da grande quantidade de tempo necessária para criar suas simulações. Consequentemente, CFD foi uma ferramenta usada quase exclusivamente por pesquisadores.

Recentes avanços no poder da computação, juntamente com processadores gráficos poderosos e manipulação interativa de modelos 3D, tornaram o processo de criação de um modelo CFD e a análise de resultados muito menos desgastantes em termos de mão de obra, reduzindo o tempo e, portanto, o custo.

Como resultado desses fatores, a dinâmica dos fluidos computacional é agora uma ferramenta de projeto industrial estabelecida, ajudando a reduzir as escalas de tempo do projeto e a melhorar os processos em todo o mundo da engenharia. Com sua popularização, deve-se criar uma cultura cética saudável para que as respostas produzidas sejam sempre questionadas e verificadas para que essa poderosa ferramenta não se torne a dinâmica dos fluidos das cores, como cita Çengel (2015), onde resultados visualmente agradáveis, porém vazios de significado, não suprimam a discussão e compreensão fundamental sobre os fenômenos estudados.

Para problemas onde o escoamento é permanente, laminar, de um fluido viscoso, incompressível e newtoniano sem efeitos de superfície livre, as equações de movimento são as da continuidade equação 4.1, que é uma equação de conservação, e a equação de Navier-Stokes, equação 4.2, uma equação de transporte e representa o transporte do momento linear em todo o domínio computacional.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad (4.1)$$

$$(\vec{U} \cdot \vec{\nabla}) \vec{U} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P' + \nu \nabla^2 \vec{U} \quad (4.2)$$

sendo \vec{U} a velocidade do fluido, ρ sua densidade e ν sua viscosidade cinemática ($\nu = \mu / \sigma$), onde μ representa a viscosidade dinâmica do fluido. A falta de efeitos de superfície livre permite o uso da pressão modificada P' , eliminando o termo da gravidade na equação 4.2. Essas equações são aplicáveis apenas a escoamentos incompressíveis, onde não há variação de densidade ou viscosidade no domínio estudado. Assim, para o escoamento tridimensional em coordenadas cartesianas existem quatro equações diferenciais combinadas para quatro incógnitas, u, v, w e P' .

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.3)$$

Conservação do momento em x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4.4)$$

Conservação do momento em y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4.5)$$

Conservação do momento em z:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4.6)$$

Essas equações diferenciais parciais foram derivadas no início do século XIX e não têm solução analítica geral conhecida, mas podem ser discretizadas e resolvidas numericamente.

Equações descrevendo outros processos, como a combustão, também podem ser resolvidas em conjunto com as equações de Navier-Stokes. Muitas vezes, um modelo de aproximação é usado para derivar essas equações adicionais, sendo os modelos de turbulência um exemplo particularmente importante.

Há vários métodos de solução diferentes usados nos códigos CFD. O mais comum é conhecido como a técnica dos volumes finitos. Nesta técnica, a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões, chamadas células. As equações são discretizadas e resolvidas iterativamente para cada célula. Como resultado, uma aproximação do valor de cada variável em pontos específicos ao longo do domínio pode ser obtida. Desta forma, tem-se uma imagem completa do comportamento do escoamento.

3.4.1 APLICAÇÕES DE CFD

A dinâmica dos fluidos computacionais é, atualmente, usada por engenheiros e cientistas em uma ampla gama de campos. Aplicações típicas incluem:

- Indústria de processo: recipientes de mistura, reatores químicos;
- Serviços de construção: Ventilação de edifícios, como átrios;
- Saúde e segurança: investigando os efeitos do fogo e fumaça;
- Indústria automobilística: modelagem de combustão, aerodinâmica de automóveis;
- Eletrônica: Transferência de calor dentro e ao redor das placas de circuito;
- Ambiental: Dispersão de poluentes no ar ou na água;
- Potência e energia: Otimização de processos de combustão; e
- Médico: fluxo de sangue através dos vasos sanguíneos enxertados.

3.4.2 METODOLOGIA DE CFD

Para solucionar as equações 4.1 e 4.2 numericamente, são realizadas as seguintes etapas:

- Modelar geometricamente o problema;
- Estabelecer um domínio computacional onde será gerada uma malha, subdividindo ele em células, que são pequenos elementos, e são vistas como pequenos volumes de controle onde versões distintas das equações da conservação são solucionadas;
- Definição das condições de contorno conforme o problema é descrito;
- Introdução dos parâmetros físicos como tipo do fluido, e suas propriedades (temperatura, densidade, viscosidade etc);
- Definição dos parâmetros numéricos e dos algoritmos de solução, geralmente especificados em cada código de CFD dentro de suas configurações;
- Determinação das condições iniciais para cada célula, ou seja, de valores iniciais de todas as variáveis de campo de escoamento. Essa etapa é o ponto de partida do processo iterativo em que se baseia a solução de cálculo;
- Resolução iterativa das equações 1 e 2 tomando como ponto inicial os valores estabelecidos no item anterior, geralmente uma solução é tomada para o centro de cada célula. A medida que as interações prosseguem, a diferença entre os lados da equação 2 vai diminuindo e tendendo ao valor nulo, onde a solução encontrada seria exata. Entretanto, em uma solução de CFD a solução nunca é exata e, portanto, a diferença nunca é identicamente nula, mas diminui a medida que as interações ocorrem, enquanto o resultado converge para o valor aproximado. O valor da diferença entre os lados da equação 2 é conhecido como resíduo e pode ser visto como uma medida da quantidade com a qual a solução para determinada equação de transporte se desvia da quantidade exata. Seu valor médio é monitorado para ajudar a determinar quando o resultado desejado foi atingido;

- Representação gráfica e análise dos resultados em termos das variáveis de campo como a velocidade e a pressão. Nesta etapa de pós-processamento, os usuários também podem definir e analisar funções personalizadas adicionais que são formadas por combinações algébricas das variáveis de campo de escoamento; e
- Propriedades globais do escoamento, como queda de pressão, e as propriedades integrais, como forças e momentos de arrasto e sustentação podem ser calculadas a partir das soluções convergidas.

4 ASPECTOS COMPUTACIONAIS E MODELAGEM

4.1 ANSYS

Essa seção é baseada na versão 18 do módulo de ajuda do ANSYS.

O ANSYS é um software pioneiro na aplicação do método de elementos finitos. O programa está dividido entre os seguintes módulos principais: geometria (Geometry), malha (Mesh), pré-processador (Setup), solução (Solution), pós-processador (Results).

Destinado à solução de diversos problemas mecânicos, ele possui módulos de análise de estruturas estáticas, dinâmicas, análise de transferência de calor e fluidodinâmica, análise de problemas acústicos e de eletromagnetismo.

O módulo de fluido-dinâmica FluidFlow CFX consiste em quatro módulos de software que usam uma geometria e malha e passam as informações necessárias para realizar uma análise de CFD. Seu fluxograma de trabalho é apresentado na Figura 8.

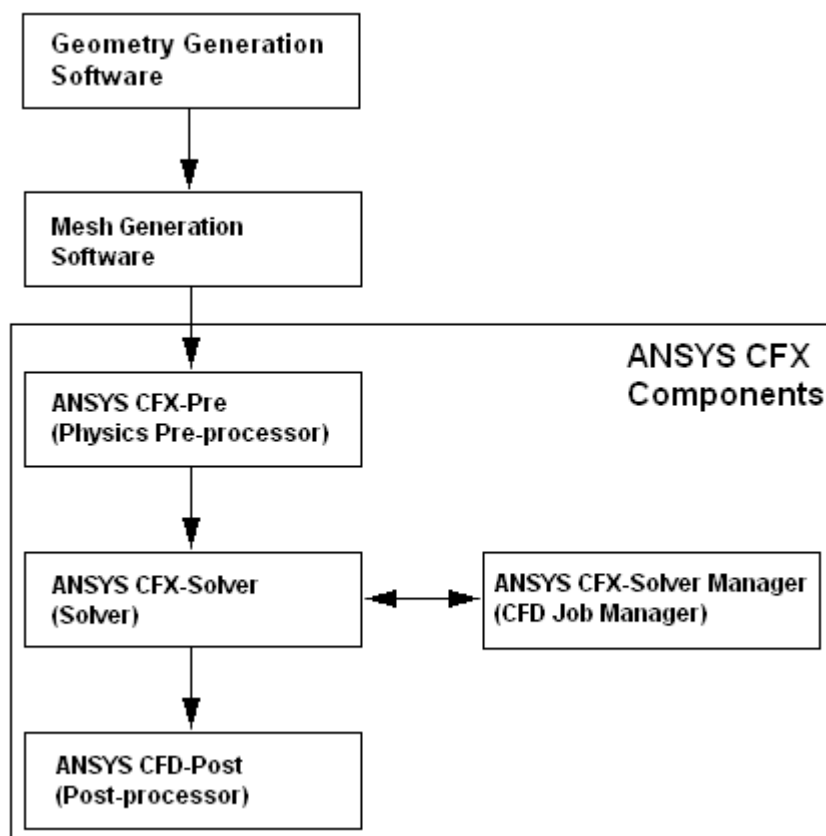


Figura 8 – Fluxograma de trabalho do CFX. Fonte: Módulo de ajuda ANSYS v.18.

- **Pré-Processador:**

O pré-processador CFX-Pre é usado para definir as simulações. Múltiplas malhas podem ser importadas, permitindo que cada seção de geometrias complexas use a malha mais apropriada.

As análises, que consistem em fluxos, condições de contorno, valores iniciais e parâmetros de solução, também são especificadas. Uma gama completa de condições de contorno, incluindo entradas, saídas e aberturas, juntamente com condições de contorno para modelos de transferência de calor e periodicidade, estão disponíveis no FluidFlow CFX através de seu pré-processador.

O controle sobre a ordem de execução da configuração e as dependências da solução entre as configurações facilita a configuração de simulações relativamente comuns, como aquelas que envolvem a inicialização de uma análise transitória usando os resultados de uma análise de estado estacionário. O uso de múltiplas configurações e controle também facilita a configuração de simulações cada vez mais complexas, por exemplo, de curvas de desempenho para turbomáquinas ou motores de combustão interna com geometria e física em evolução.

- **Solver:**

O CFX-Solver resolve todas as variáveis da solução para a simulação da especificação do problema gerada no pré-processador.

Uma das características mais importantes do FluidFlow CFX é o uso de um solucionador acoplado, no qual todas as equações hidrodinâmicas são resolvidas como um único sistema. O solucionador acoplado é mais rápido que o solver segregado tradicional e são necessárias menos iterações para obter uma solução de fluxo convergente.

- **Solver Manager:**

O módulo CFX-Solver Manager oferece o controle de gerenciamento da tarefa CFD. Suas principais funções são especificar os arquivos de entrada do Solver, iniciar ou parar o processo iterativo monitorar o progresso da solução a medida em que as iterações ocorrem.

- **Pós-Processador:**

O CFD-Post oferece ferramentas gráficas de pós-processamento interativo para analisar e apresentar os resultados da simulação do ANSYS CFX. Dele poderão ser extraídos os relatórios gerados na resolução do problema. É nessa etapa que o usuário pode visualizar

graficamente os resultados, podendo também trabalhar com os parâmetros resultantes da solução.

4.2 MODELAGEM

- **Malha**

Uma das etapas mais importantes em qualquer modelagem CFD é a geração da malha que definirá o domínio estudado. Ela divide o interior do domínio em pequenos elementos onde as equações de movimento 4.1 e 4.2 são resolvidas. O elemento adotado e o refinamento da malha deve ser escolhida de acordo com o problema, definindo a qualidade da solução. Nesse trabalho foi utilizado o próprio gerador de malha do ANSYS e o elemento adotado foi o tetraédrico, como indica a **Figura 9** e a **Figura 10**, mais adequado para as análises realizadas.

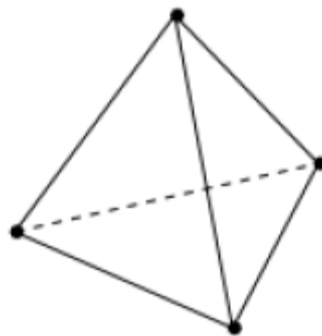


Figura 9 – Elemento tetraédrico adotado. Fonte: Guia do usuário ANSYS.

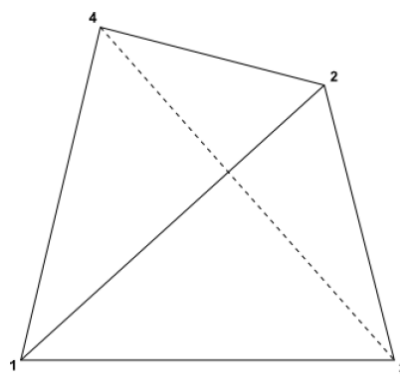


Figura 10 – Faces do elemento tetraédrico. Fonte: Guia do usuário ANSYS.

A Tabela 2 apresenta a associação entre os nós e as faces do elemento tetraédrico da Figura 10.

Tabela 2 – Nós associados do elemento tetraédrico.

Face	Nós associados
Face 1	3-2-4
Face 2	4-1-3
Face 3	2-1-4
Face 4	3-1-2

No trabalho, foram adotados os seguintes parâmetros:

Method: Tetrahedrons

Size Function: Curvature

Max Face Size: 9,6079e-2 m

Deeature Size: 4,804e-4 m

Growth Rate: Default (1,20)

Min Size: Default (9,6079e-4 m)

Max Tet Size: Default (0,192160 m))

Curvature Normal Angle: Default (18,0°)

Smoothing: Medium

Com o padrão estabelecido, foram geradas duas malhas, uma não-estruturada, M1 e outra híbrida, M2, composta por uma região não estrutura e, próximo a superfície do cilindro, uma região estruturada mais refinada, onde a distorção dos elementos em relação a sua forma original poderiam causar maior interferência nos resultados.

- **Condições de Contorno**

Para modelar um escoamento, é preciso impor condições de contorno para as fronteiras do domínio computacional.

Como condição de entrada de escoamento, é estabelecido um valor de velocidade U correspondente ao regime de escoamento desejado, sendo seu valor definido através da imposição dos parâmetros de viscosidade dinâmica, μ , e de densidade do ar, ρ , para a temperatura de 25°C, fornecidos por Çengel (2015) para a pressão de 1 atm, conforme mostra a Tabela 3. Fixos os parâmetros, na equação 3.15, de forma que o valor do número de Reynolds defina o regime de escoamento desejado para a análise, é extraído o valor da velocidade de entrada necessária.

Tabela 3 – Propriedades do ar à pressão de 1 atm. Fonte: Çengel (2015).

Temperatura (°C)	25
ρ (kg/m ³)	1,184
μ (kg/ms)	$1,849 \times 10^{-5}$

Pelo manual do usuário do ANSYS, sabe-se que o programa considera as variações da densidade insignificantes para valores do número de Mach inferiores a 0,3. Dessa forma, o programa adota um modelo incompressível para o escoamento para esse intervalo.

Como condição de saída, foi imposta na modelagem dos casos desse trabalho o valor de pressão, P , igual à 0. Esse valor será usado apenas para os casos de escoamento subsônico, que abrange os casos aqui estudados.

Para delimitar o cilindro, acrescentou-se a condição de fronteira do tipo parede, de forma que ele seja considerado uma parede onde não há deslizamento. Desse modo, a velocidade em sua superfície respeitará a condição de não escorregamento da mecânica dos fluidos.

As fronteiras laterais ao escoamento também foram consideradas como paredes, porém na condição de escorregamento livre, não tendo influência sobre os resultados analisados da região mais próxima ao cilindro.

Os contornos do domínio computacional adotado são representados na Figura 11.

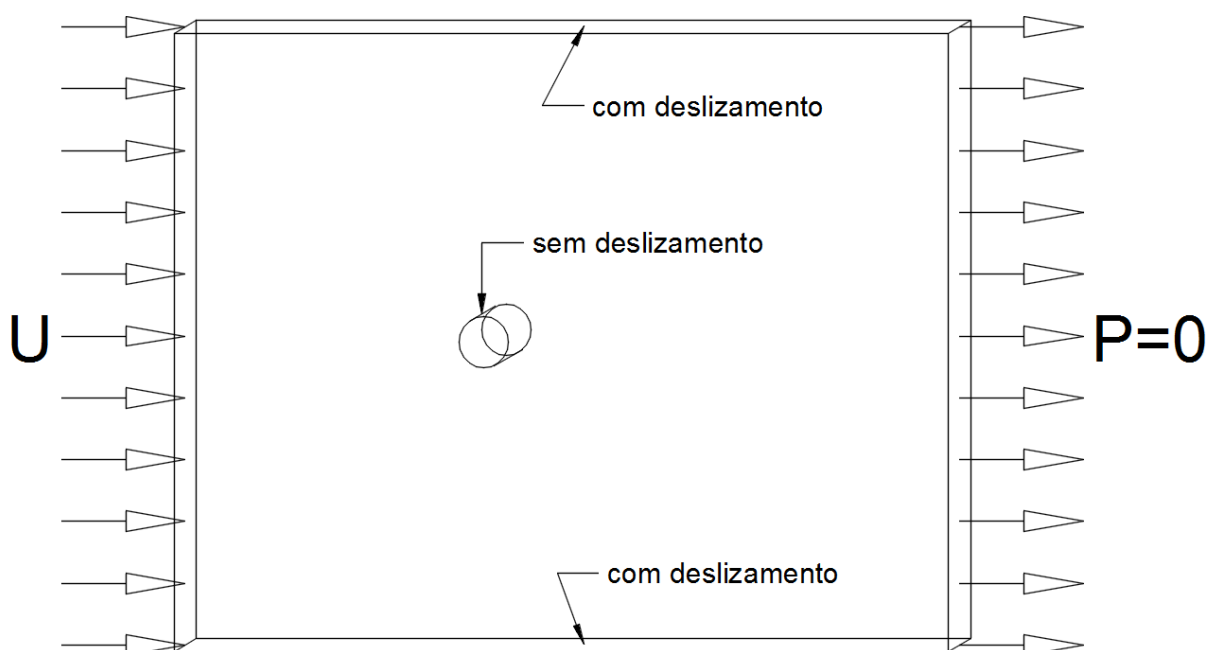


Figura 11 – Condições de contorno impostas.

5 RESULTADOS

5.1.1 CASO 1 – VALIDAÇÃO

O primeiro caso em estudo é o do escoamento laminar em torno de um cilindro circular para número de Reynolds 40. Para esse valor, o escoamento em torno do cilindro é realizado em regime permanente existindo separação no escoamento. Pretende-se aqui averiguar o coeficiente de arrasto, comparando com os valores levantados por Pereira (2010) em sua dissertação. A dimensão do domínio modelado segue o padrão estabelecido na Figura 12.

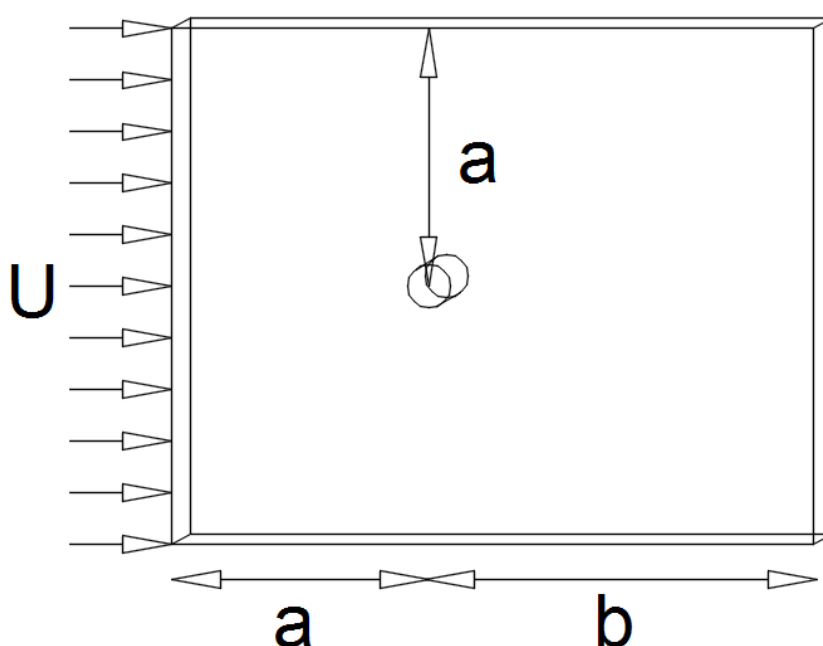


Figura 12 – Parâmetros dimensionais do domínio.

Os valores adotados de a e b foram, respectivamente, $12D$ e $18D$, onde o diâmetro do cilindro e a altura do domínio foram adotados como $0,05\text{m}$. Para atingir o valor do número de Reynolds de 40, fixou-se os parâmetros μ e ρ da Tabela 3, dessa forma, a variável velocidade foi definida como $0,0125\text{m/s}$.

Para o domínio definido, foram geradas duas malhas, M1 e M2, onde M1 é uma malha não estruturada, Figura 13, e M2 uma malha híbrida, Figura 14, composta por uma região não estruturada e outra estruturada nas proximidades da superfície do cilindro, onde os principais efeitos de interesse se encontram. As características das malhas M1 e M2 encontram-se na Tabela 4.

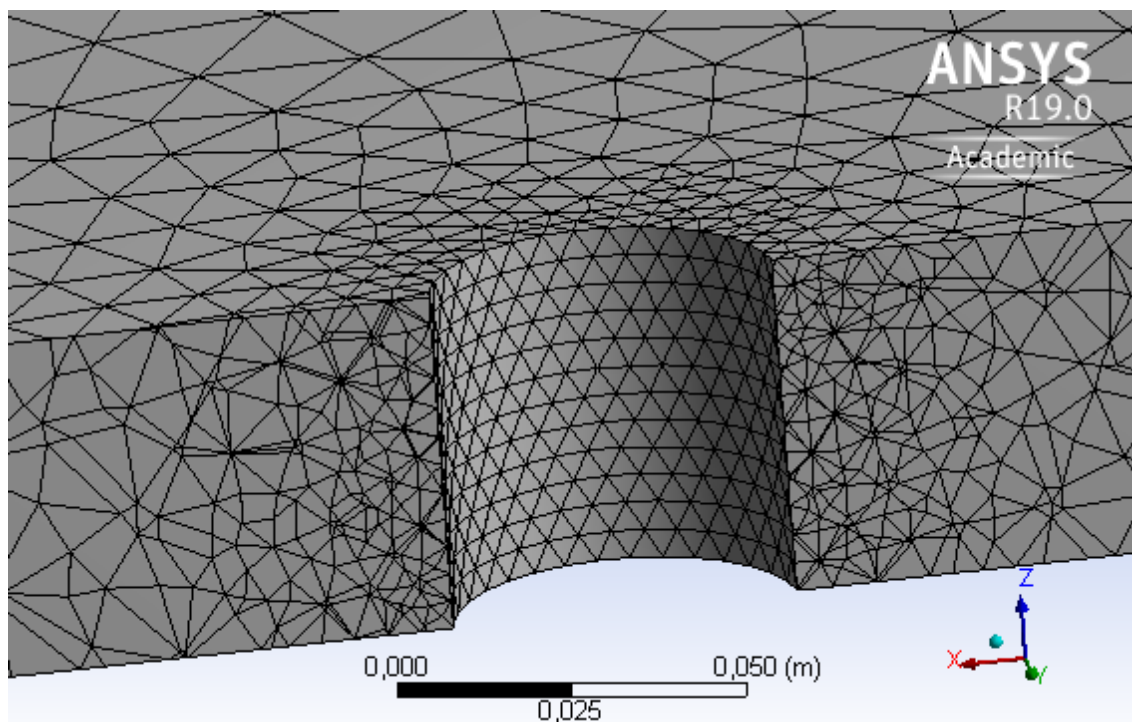


Figura 13 – Detalhe da malha não estruturada M1

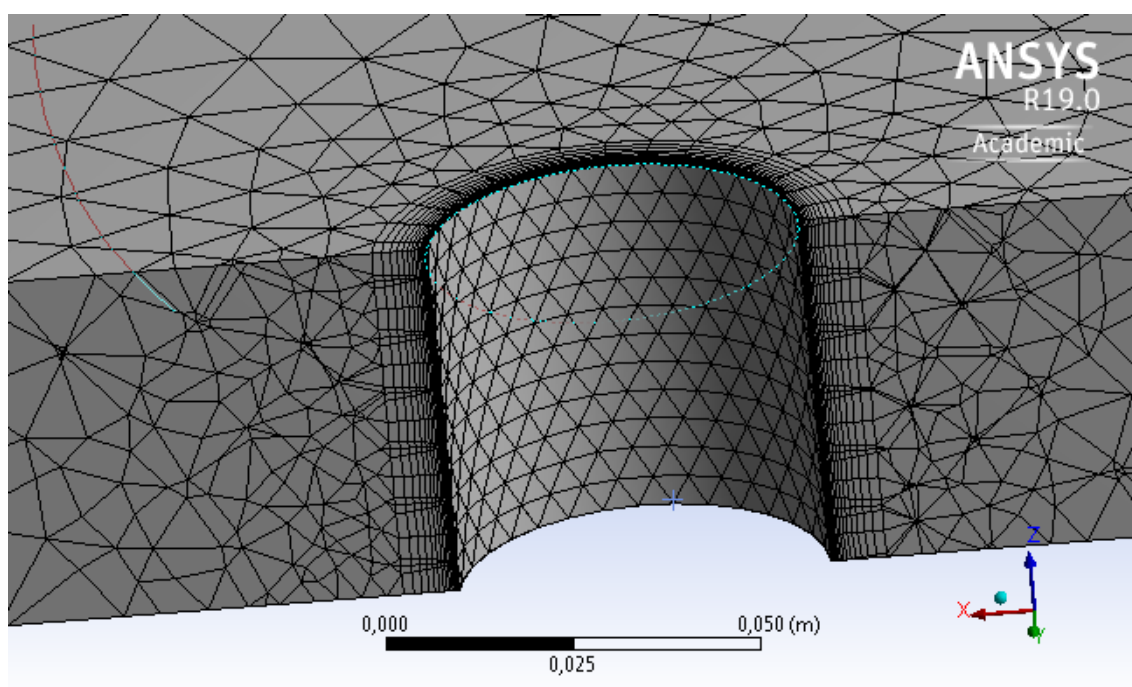


Figura 14 – Detalhe da malha híbrida M2

Tabela 4 – Características das malhas usadas.

Malha	n ° elementos
M1	17554
M2	25149

A Tabela 5 apresenta a comparação entre os resultados que Pereira (2010) usa como comparação com os obtidos através do ANSYS CFX.

Tabela 5 – Comparação dos valores obtidos do C_D com a literatura.

	Dennis	Takami	Tuann	Fornberg	H.Ding	Pereira	M1	M2
C_D	1,522	1,536	1,675	1,498	1,713	1,597	1,7001	1,7166

Apesar da variação obtida entre os valores do coeficiente de arrasto, C_D , obtidos e os exemplificados no trabalho de Pereira (2010), os resultados foram considerados satisfatórios por estarem dentro dos valores previstos no Gráfico 3. A variação encontrada pode ser causada pelo uso de diferentes parâmetros de entrada não explicitados pelo autor ou também pelo uso de diferentes versões do ANSYS.

Na Figura 15 encontra-se representado o resultado do escoamento modelado para a malha M2, onde é possível observar de forma clara sua simetria. Como comparação, apresenta-se a Figura 16 retirada da dissertação de Pereira (2010) para o mesmo padrão de escoamento. Essa malha foi escolhida por permitir melhor resolução junto a parede do cilindro, além de ter sua estrutura alinhada com o escoamento, diminuindo o erro numérico.

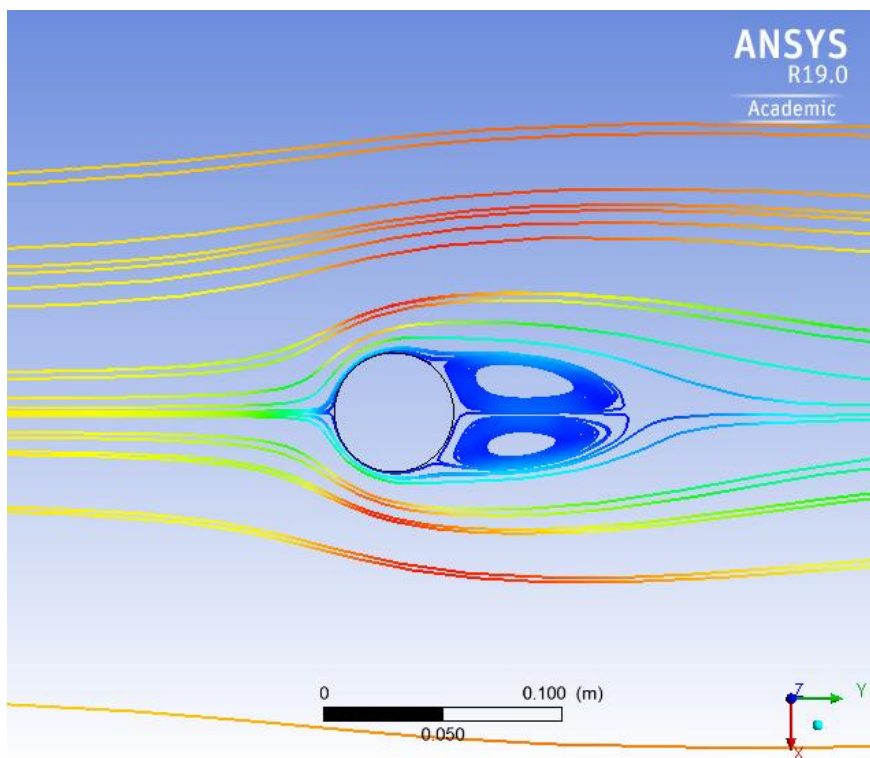


Figura 15 – Padrão das linhas de corrente para $Re=40$ na simulação do escoamento laminar em torno de um cilindro circular.

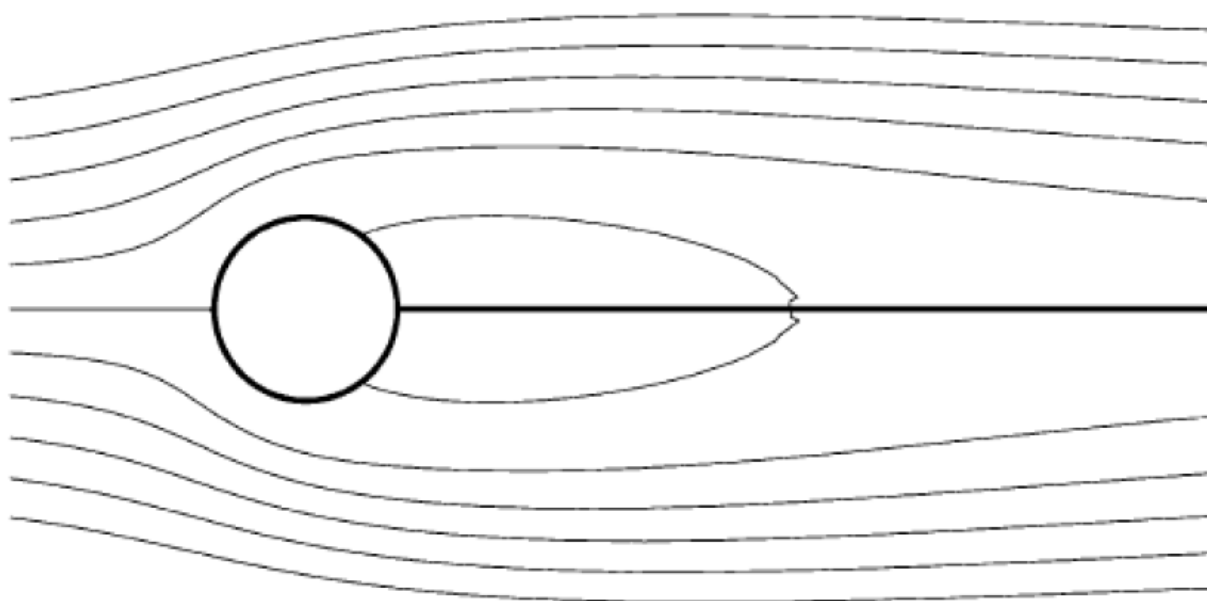


Figura 16 – Padrão das linhas de corrente para $Re=40$ na simulação do escoamento laminar em torno de um cilindro circular. Fonte: Pereira (2010).

Também foi realizado um teste de resíduos na malha M2, representado pelo Gráfico 4, para estudar sua influência nos resultados obtidos para o coeficiente de arrasto. Esse teste é feito para aumentar a eficiência do processamento de simulações similares, uma vez que

estabelece o limite para o qual não vale mais a pena gastar em esforço computacional, já que os resultados não sofrerão mais alterações significativas para o estudo em questão.

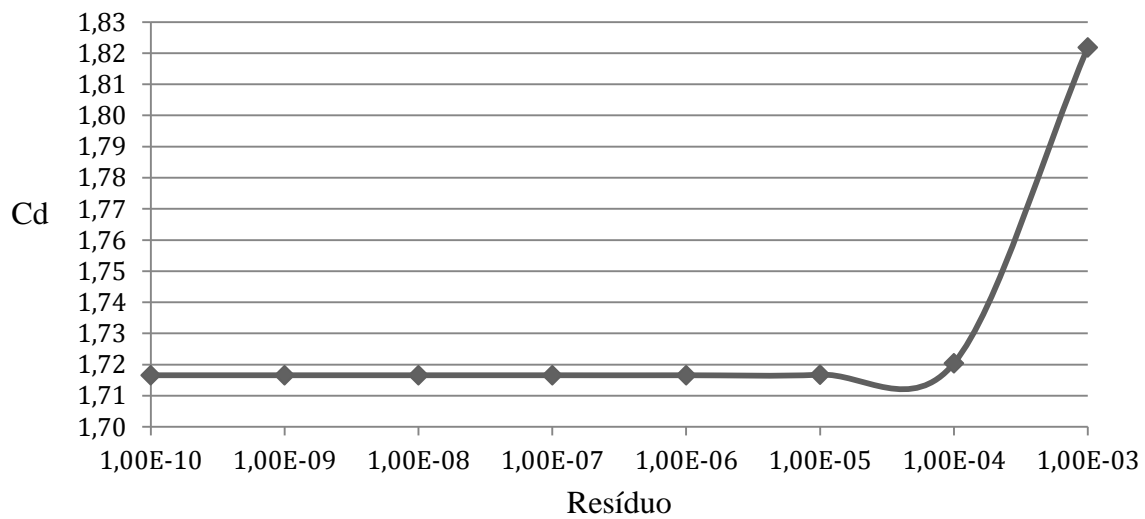


Gráfico 4 – Teste de resíduos em função do C_d para um escoamento laminar em torno de um cilindro a $Re=40$.

Pode-se assim observar que a partir do valor estabelecido para os resíduos de $1,00E-6$, o valor do coeficiente de arrasto, C_d , converge para o valor aproximado de 1,72. Dessa forma, as próximas simulações desenvolvidas nesse trabalho adotarão esse valor de resíduo de forma a otimizar o custo computacional, reduzindo o tempo de trabalho.

O Gráfico 5 mostra a diminuição do valor dos resíduos a medida que o processo iterativo ocorre no ANSYS CFX, levando os resultados a convergência.

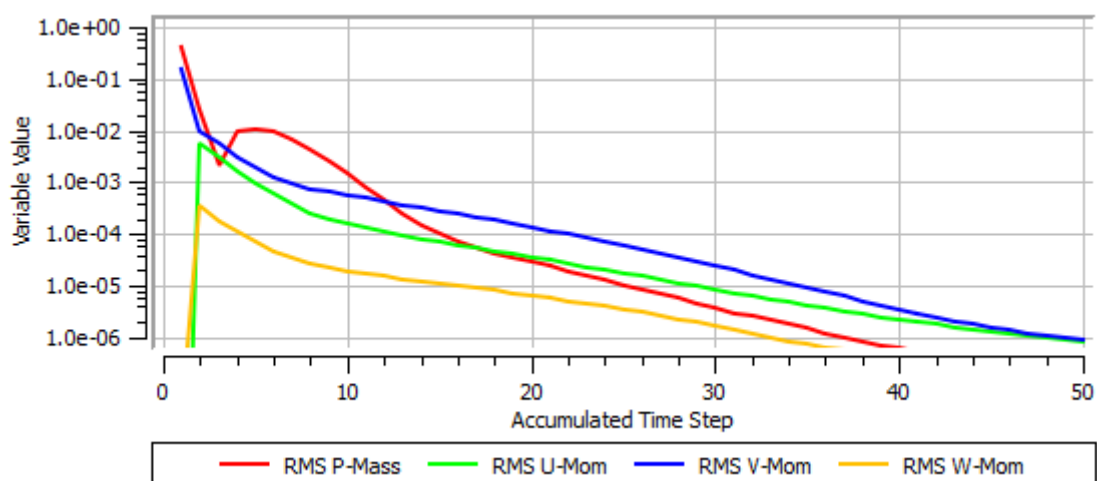


Gráfico 5 – Acompanhamento do valor dos resíduos.

5.1.2 CASO 2 – INFLUÊNCIA DAS DIMENSÕES DO DOMÍNIO

O segundo caso apresenta um estudo da influência das dimensões do domínio nos resultados obtidos. Tomando como base o padrão gerado por Nidhul et al(2014). Foram criados doze domínios com dimensões que variam de acordo com a Tabela 6.

O padrão de malha adotado foi o mesmo da malha M2 com o número de resíduos limitado a $1,00E-6$. Assim, também foi simulado um escoamento laminar a um número de Reynolds igual a 40, mantendo o valor $D = 0,05$ m. As dimensões do domínio representam os parâmetros a e b apresentados na Figura 12.

Tabela 6 – Efeitos da distância das fronteiras no valor do coeficiente de arrasto, C_D , para um Reynolds de 40.

Dimensões do domínio	Nº elementos	C_D	Variação (%)
4D e 9D	23513	2,01	-
5D e 10D	23894	1,96	6
6D e 11D	24237	1,84	12
7D e 12D	23977	1,81	3
8D e 13D	24082	1,78	3
9D e 14D	24016	1,76	2
10D e 15D	24557	1,76	0
11D e 16D	24921	1,73	3
12D e 17D	25258	1,72	2
13D e 18D	25018	1,71	1
14D e 19D	25579	1,71	0
15D e 20D	25726	1,71	0

Do estudo da independência do domínio, observa-se que para a distância de treze diâmetros partindo do centro do cilindro até as fronteiras frontal e laterais, juntamente com a distância de dezoito diâmetros até a fronteira traseira, o resultado do coeficiente de arrasto converge para 1,71. Logo, o domínio com essas dimensões será adotado como o mais eficiente para o estudo.

5.1.3 CASO 3 – INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE REYNOLDS

Com os parâmetros estabelecidos nos casos anteriores de $1,00E-6$ para o valor dos resíduos o padrão 13D – 18D para as dimensões do domínio, o terceiro caso analisa a influência do número de Reynolds no regime de escoamento. Foram simulados dois escoamentos. O primeiro a um número de Reynolds de 1, buscando o escoamento descrito na Tabela 1 (a), e o segundo representa o resultado obtido no caso 2 para as dimensões adotadas.

A Figura 17 mostra o escoamento ao valor do número de Reynolds igual a 1, onde as linhas de fluxo aderem quase perfeitamente a superfície do cilindro, sendo simétricas em relação ao eixo transversal e longitudinal do cilindro, como é mostrado na Tabela 1 do item 3.3 desse trabalho. A similaridade com o escoamento potencial é apenas visual, uma vez que o coeficiente de arrasto medido foi de 12,66, valor próximo ao esperado dos resultados experimentais representados Gráfico 3.

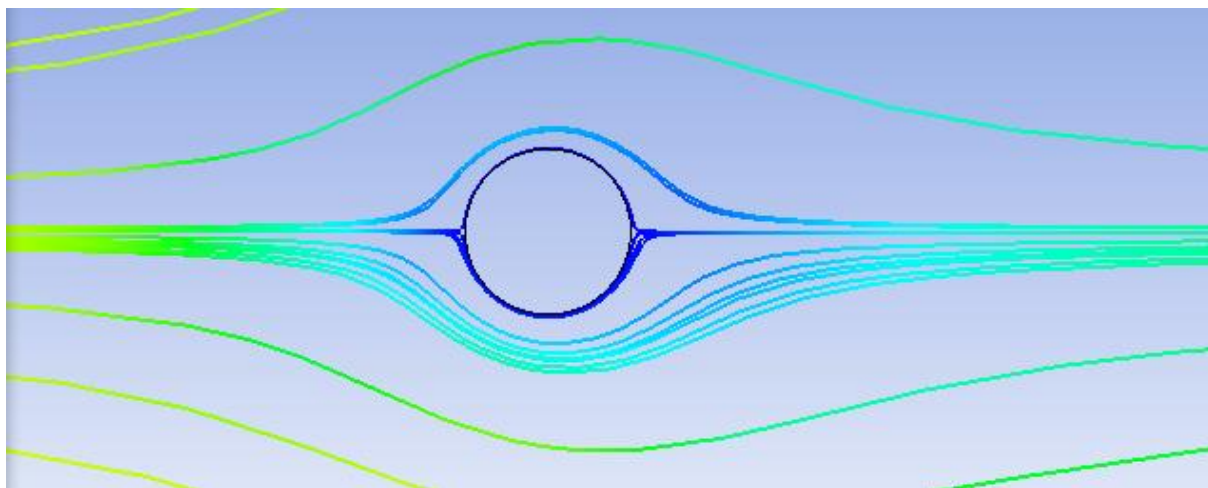


Figura 17 – Escoamento laminar a $Re=1$.

A Figura 18 mostra as linhas de fluxo com par fixo de vórtices, como esperado para o valor de Reynolds de 40. O coeficiente de arrasto medido para essa condição foi de 1,71, valor considerado satisfatório em comparação com a literatura.

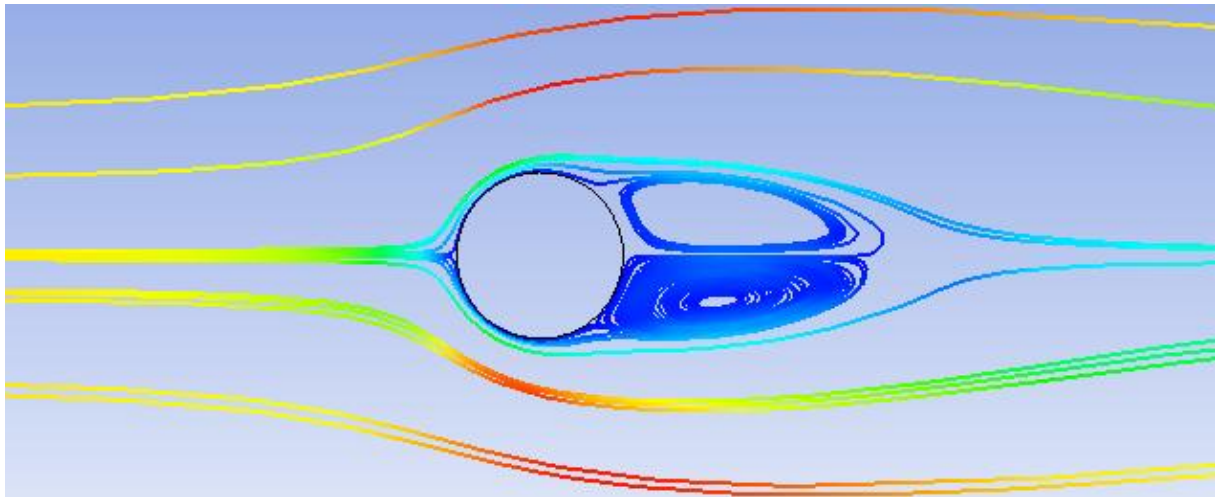


Figura 18 – Escoamento laminar a $Re=40$.

- **Reflexões:**

Do caso a Reynolds a 40 com domínio definido pelas dimensões 13D e 18D aplicadas a Figura 12, duas linhas auxiliares foram traçadas para a coleta de resultados dos parâmetros de velocidade e pressão. A primeira foi traçada na direção ortogonal ao escoamento, Figura 19, e, a segunda, na direção paralela a ele, Figura 20.

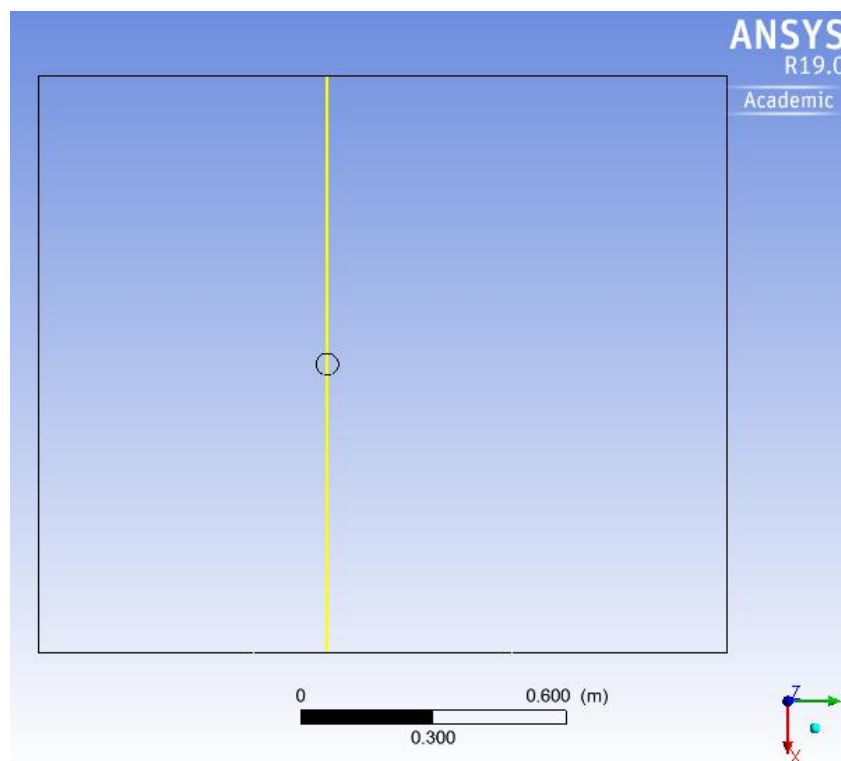


Figura 19 – Linha de coleta de resultados na posição ortogonal ao escoamento.

Analisando de forma qualitativa os resultados de velocidade, Gráfico 6, e pressão, Gráfico 7, nas laterais do cilindro, nota-se que elas se comportam de forma inversa. A medida que se aproxima do longe para perto do cilindro, a velocidade sobe, atingindo um valor máximo nas proximidades da superfície do cilindro e, então, sofre uma queda repentina gerada pela presença da camada limite, que impõe a condição de não escorregamento em sua superfície, fazendo com que nela, a velocidade tenha valor nulo. Da pressão, percebe-se a que seu valor cai à medida que se aproxima do cilindro, dado a relação estabelecida por Bernoulli, uma vez que na região, a energia do escoamento está concentrada da parcela cinética correspondente a velocidade.

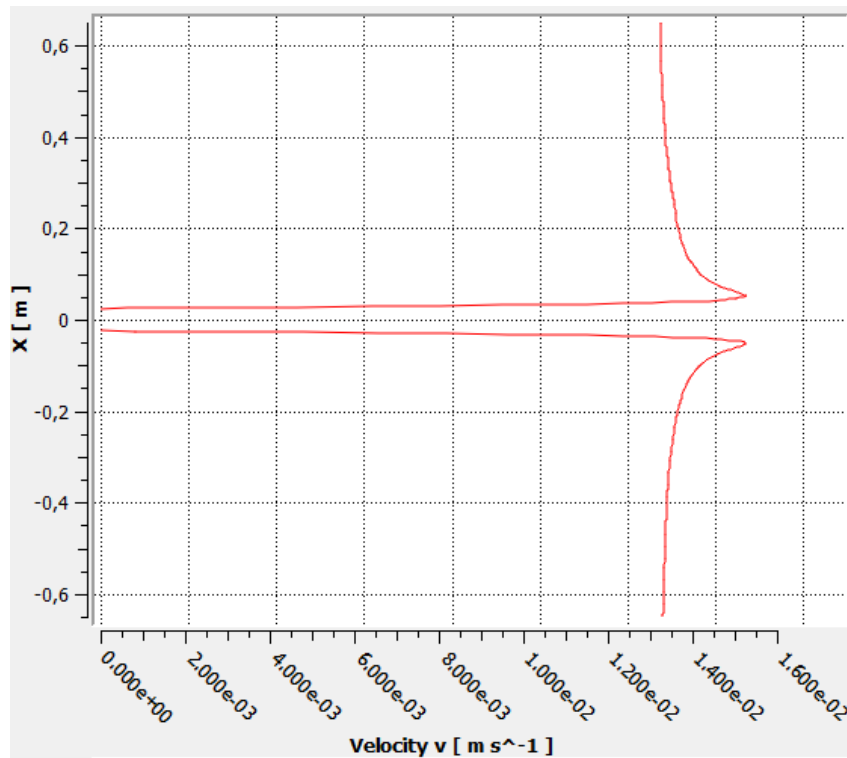


Gráfico 6 – Velocidade nas laterais do cilindro.

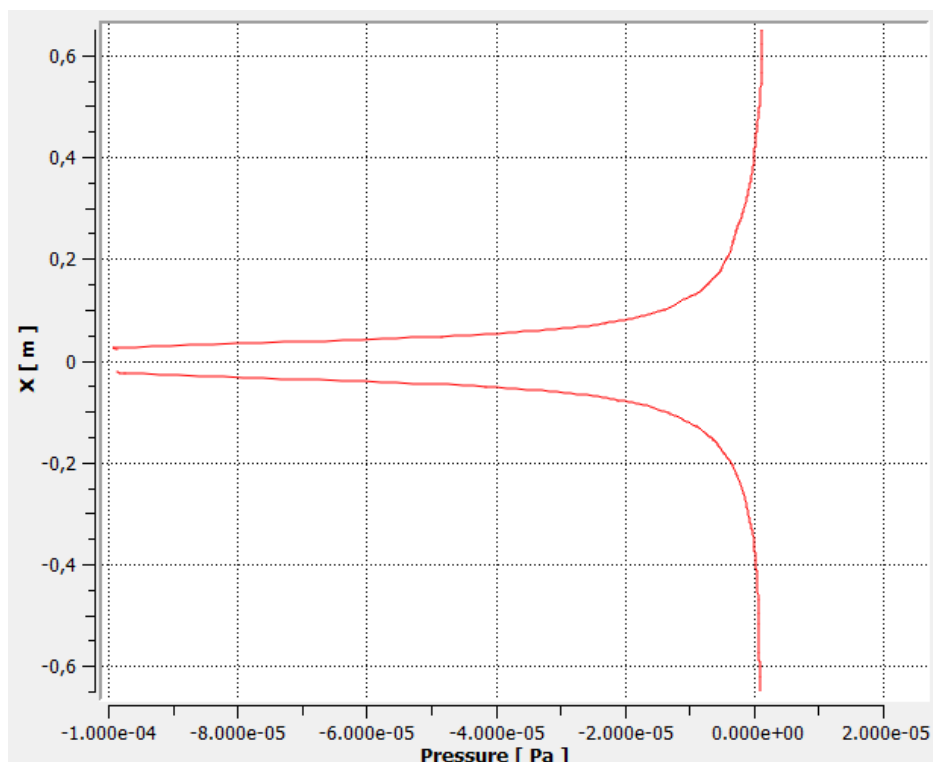


Gráfico 7 – Pressão nas laterais do cilindro.

Da linha posicionada na direção do escoamento a partir do centro do cilindro, são retirados os valores de velocidade e pressão mostrados no Gráfico 8 e Gráfico 9.

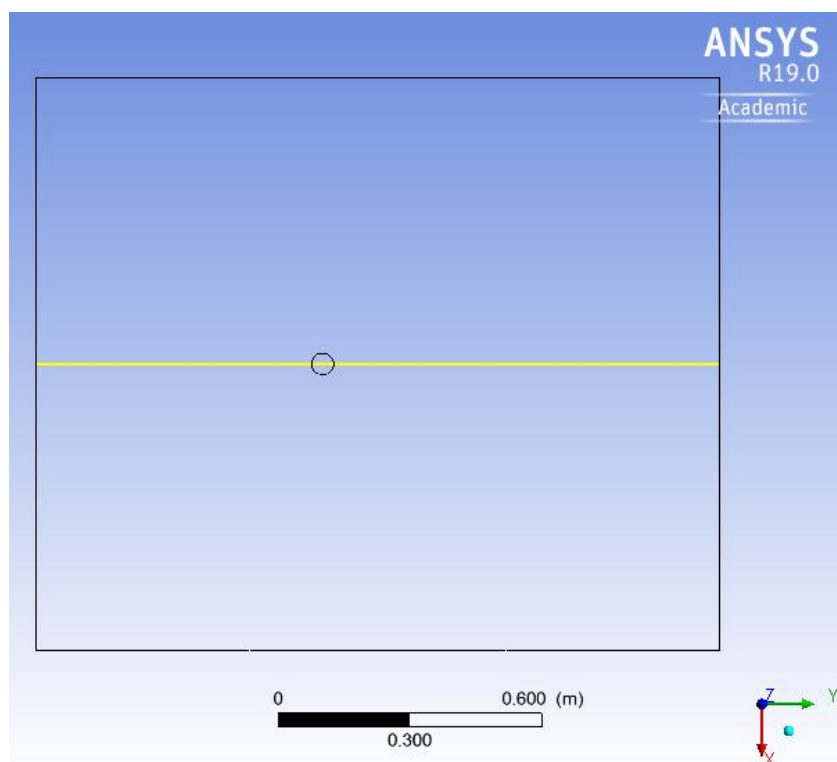


Figura 20 - – Linha de coleta de resultados na posição ortogonal ao escoamento.

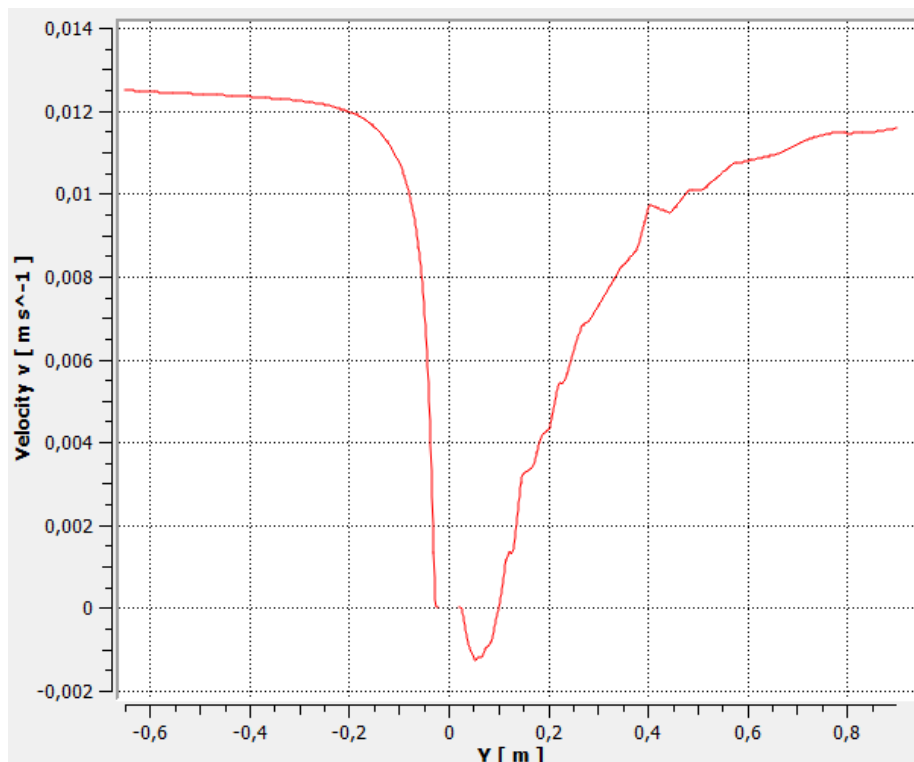


Gráfico 8 – Velocidade ao longo do sentido do escoamento.

É possível notar do Gráfico 8 que o efeito da presença do cilindro começa a ser sentida antes que o escoamento o atinja. A velocidade entra em um processo de decaimento até chegar ao valor nulo no ponto de estagnação frontal. Após o cilindro, na região de esteira, a velocidade parte do valor nulo, dada a condição de não escorregamento da superfície e sofre uma queda gerada pela região de recirculação à jusante do cilindro. A medida em que se afasta dele, o valor da velocidade começa a se recuperar, porém, dada a perda de energia sofrida pelos efeitos viscosos, assim como pela formação dos vórtices fixos, ela não volta a atingir o seu patamar inicial.

Da análise da pressão ao longo do escoamento, observada no Gráfico 9, também nota-se sua relação inversa com os valores da velocidade, uma vez que no ponto de estagnação, a pressão atinge seu valor máximo, o que já era esperado a partir dos fundamentos teóricos. Porém, comprovando a divergência do paradoxo de D'Alembert, ela não possui simetria em torno desse eixo, uma vez que energia é perdida no escoamento. Assim, após o cilindro, forma-se um bolsão de baixa pressão. Essa diferença é responsável pela força de arrasto presente no cilindro, formada pela diferença do campo de pressões em sua superfície.

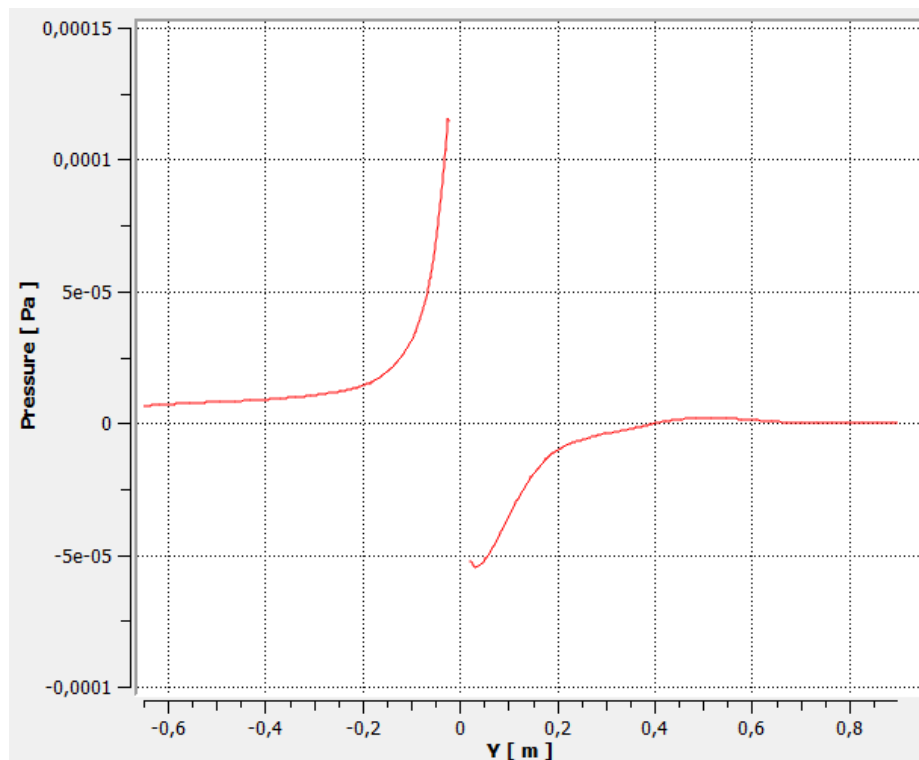


Gráfico 9 – Pressão ao longo do sentido do escoamento.

Esse campo de pressões pode ser analisado através do coeficiente de pressão obtido em torno do cilindro. Da Figura 21, observa-se que a distribuição de pressões não é simétrica em relação ao eixo paralelo ao escoamento, como é esperado da teoria do escoamento potencial. Isso ocorre porque no escoamento real, as linhas de fluxo não conseguem acompanhar perfeitamente a geometria do cilindro e acabam se separando dele. Ver respectiva tabela no ANEXO D.

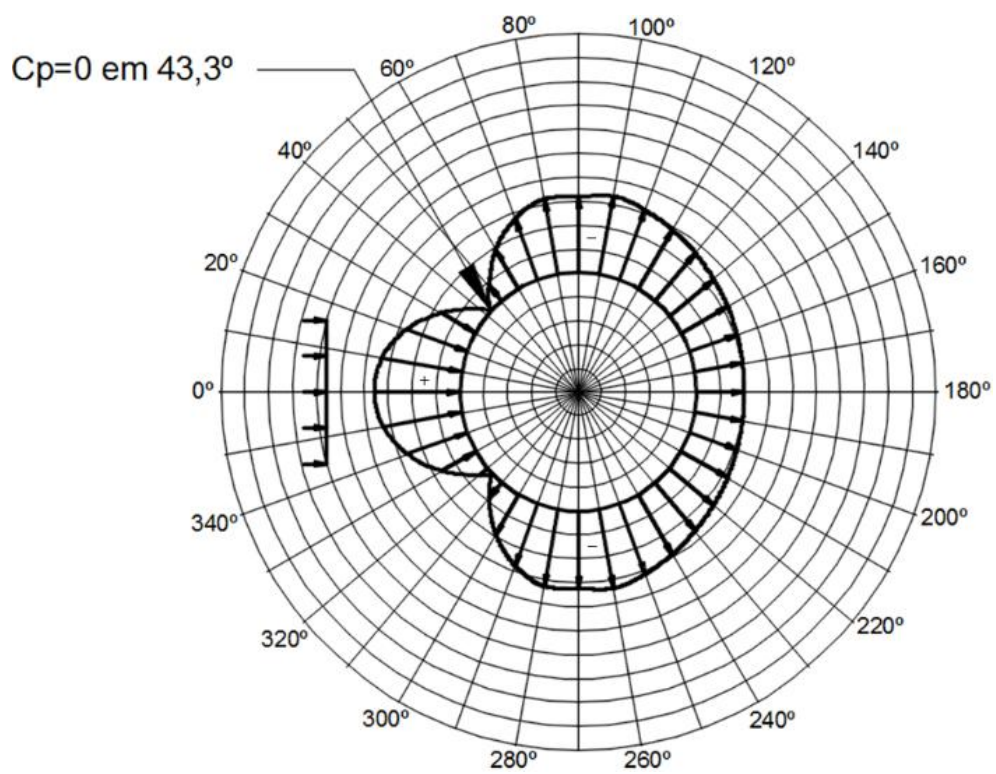


Figura 21 – Variação de C_p obtido para a superfície externa do cilindro.

6 CONCLUSÕES

Esse trabalho apresenta resultados da simulação de um escoamento laminar em torno de um cilindro rígido a baixos valores do número de Reynolds. Com objetivo, os resultados obtidos foram considerados de forma satisfatória em relação aos existentes na literatura, sendo notória a divergência em relação ao escoamento potencial, puramente teórico.

A análise dos coeficientes de arrasto e pressão mostrou que em um escoamento real, ainda que laminar, existe força de arrasto resultante graças à variação do campo de pressão em torno do cilindro.

As análises também retornaram um processamento mais eficiente do problema, dado o valor máximo de resíduos exigido sem que houvesse perda de qualidade dos resultados foi estabelecida, ou seja, foi determinado um valor para qual o erro entre a solução encontrada e a solução exata do problema fosse mínimo. Além disso, também se estabeleceu as dimensões ideais que o domínio ao qual o escoamento está confinado deveria possuir, de maneira que a distância de suas fronteiras não interferisse no resultado do coeficiente de arrasto, mas que também seu tamanho não fosse exagerado, gerando maior custo computacional sem melhoria significativa do resultado. Para análises mais completas, a eficiência em termos de esforço computacional deve ser ponderada, uma vez que outros resultados de interesse podem ser prejudicados.

Finalmente, o maior aprendizado foi a percepção de que o programa adotado é apenas uma ferramenta de estudo, não substituindo a necessidade do entendimento físico do problema. Assim, deve-se tomar cuidado, pois resultados convidativos podem ser gerados sem possuírem significado físico, devendo sempre ser analisados de forma crítica, de maneira que o tempo poupado na resolução do problema de forma computacional seja usado em sua interpretação.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

AMARANTE, Odilon A. Camargo do; BROWER, Michael; SÁ, Antonio Leite de. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Brasília: CRESEB - CEPEL, 2001. 45 p. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=1>>. Acesso em 03 março 2018.

ANSYS V18 HELP. Módulo de ajuda do ANSYS versão 18.

BLESSMANN, Joaquim. Aerodinâmica das construções. 3. ed. Porto Alegre: Ufrgs Editora, 2011. 264 p.

CARVALHO, Gustavo Bifaroni. Estudo experimental do escoamento em torno de cilindros circulares em movimento de rotação. 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programas de Pós-graduação de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

DUTRA, Ricardo Marques. Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica Face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro. 2001. 309 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Planejamento Energético, Programa de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FADIGAS, Eliane A. Faria Amaral. Energia eólica. Barueri: Manole, 2011. (Série sustentabilidade).

FERREIRA, Juliano Luiz. Um estudo de ações dinâmicas em plataformas offshore utilizando dinâmica dos fluidos computacional. 2012. 187 f. Monografia de Projeto Final 2 - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

GOLDEMBERG, José. Energia e desenvolvimento sustentável. São Paulo: Blucher, 2010. 4 v. (Série sustentabilidade).

KHALIL, Rachel Viana. Estudo numérico de escoamento ao redor de um cilindro circular fixo. 2016. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

KUMAR, Arbund; SINGH, Sadhu; KUMAR, Raghuvir. Analysis of stresses due to flow past a circular cylinder by a numerical technique. Elsevier Science, Northern Ireland, v. 62, n. 0308-0161(95), p.147-152, 22 fev. 1994.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Acordo de Paris. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 14 jan. 2018.

MAUAD, Frederico Fábio; FERREIRA, Luciana da Costa; TRINDADE, Tatiana Costa Guimarães. Energia Renovável no Brasil: Análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras. São Carlos: EESC/USP, 2017. 349 p.

MME; EEP. Plano Decenal de Expansão de Energia 2026. Brasília: Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética: MME/EPE, 2017. 309 p. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde>>. Acesso em: 17 março 2018.

MUNSON, Bruce R.; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H.. Fundamento da mecânica dos fluidos. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2015. 571 p.

NASCIMENTO, Andreia Aoyagui; MARIANO, Felipe Pamplona; PADILLA, Elie Luis Martinez; NETO, Aristeu da Silveira. Escoamento sobre cilindro utilizando a metodologia IMERSPEC. Simpósio de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

NIDHUL K.; Sunil A. S.; Benphil M., C. Effect of Domain Size and Grid Spacing on Flow Past A Circular Cylinder At Low Reynolds Number. International Journal Of Engineering Research & Technology (IJERT). Thrissur, India, p. 1365-1368. 08 ago. 2014.

NITZ, Brian. World's oldest windmills may stop in Nashtifan, Iran. 2017. Disponível em: <<https://www.greenprophet.com/2017/04/worlds-oldest-windmills-may-stop-in-nashtifan-iran/>>. Acesso em: 28 abril 2018.

OLIVEIRA, Adilson de; PEREIRA, Osvaldo Soliano. Energia eólica. São Paulo: Senac, 2012. 213 p.

PARK, Cheol-Woo; LEE, Sang-joon. Free end effects on the near wake flow structure behind a finite circular cylinder. Elsevier: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Pohang, South Korea, p. 231-246. 2000.

PEDROSO, Lineu José (1997). Interação Fluido-Estrutura (Notas de Aula e Apostila Interna de Curso) UnB-FT/ENC-PECC-GDFE.

PEDROSO, Lineu José (2018). “Manuscritos, Esquemas, Discussões e Notas de Seções de Orientações, 2017-2018”. In: Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – PECC/ GDFE, Universidade de Brasília (UnB), Brasil.

PEDROSO, Lineu José. (2003) - Introdução ao Método dos Elementos Finitos. Publicação Didática (Apostila Interna); UnB-FT/ENC-PECC-GDFE.

PEDROSO, Lineu José (1982) Interação dinâmica fluido-estrutura. Rudimentos da hidrodinâmica. Publicação didática (Apostila Interna), UnB-FT/ENC.

PEREIRA, Ivo Alexandre Brás Barroso. escoamento Turbulento em Torno de um Cilindro a Baixo Número de Reynolds: Comparação entre Modelos de Turbulência. 2010. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto, 2010.

PINTO, Milton. Fundamentos de energia eólica. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. 368 p.

SANTOS, Tharcio Castro. Uma contribuição ao estudo de ações dinâmicas do vento em edifícios altos comparando diferentes metodologias. 2017. 57 f. Monografia de Projeto Final

2 - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

VASCONDELLOS, Guilherme Loyola; MELO, André Barrouin; FREITAS, Paulo Henrique Andrade; HANRIOT, Sérgio de Moraes; MAIA, Cristina Brasil. Estudo numérico do escoamento ao redor de um cilindro circular em um túnel de vento para baixas velocidades para diferentes rotações. XI Simpósio de Mecânica Computacional. Juiz de Fora. 2014

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M.. Mecânica dos fluidos: Fundamentos e aplicações. 3. ed. São Paulo: Mc Graw Hill Education, 2015. 990 p.

ANEXO A

Tabela 7 – Potência instalada no Brasil segundo a fonte: Junho de 2018. Fonte: ANEEL.

Origem	Potência (MW)	(%)
Biomassa	14.603	8,70
Eólica	12.894	7,68
Fóssil	26.764	15,95
Hídrica	102.123	60,84
Nuclear	1.990	1,19
Solar	1.306	0,78
Importação	8.170	4,87
Total	167.850	100

Tabela 8 – Comparação da estimativa de evolução da potência instalada em fonte eólica e total no Brasil: Fonte: MME.

Ano	Potência Eólica (MW)	Potência Total (MW)	(%)
2016	10.025	148.392	6,8
2017	12.843	158.249	8,1
2018	15.598	167.452	9,3
2019	16.645	172.118	9,7
2020	17.645	175.974	10,0
2021	19.450	180.646	10,8
2022	21.254	192.546	11,0
2023	23.058	185.646	12,4
2024	24.862	199.136	12,5
2025	26.666	206.539	12,9
2026	28.470	212.552	13,4

ANEXO B

Determinação da força resultante sobre cilindro em escoamento potencial uniforme.

A função potencial para um cilindro é:

$$\phi = +U \left(r + \frac{R^2}{r} \right) \cos \theta \quad (\text{B.1})$$

onde:

U : velocidade no infinito;

r, θ : coordenadas polares;

R : raio do cilindro.

Para se obter as pressões em torno do cilindro, basta aplicar a equação de Bernoulli transiente ao longo da linha de corrente que passa pelo bordo do cilindro:

$$P = -\rho \frac{\partial v}{\partial t} - \rho \frac{1}{2} U^2 - \rho g z \quad (\text{B.2})$$

onde:

v : vetor velocidade;

ρ : densidade do fluido;

g : constante gravitacional;

z : altura.

No escoamento permanente, $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$.

Escoamento passa por um mesmo plano na horizontal, assim, considera-se a altura $z = cte$.

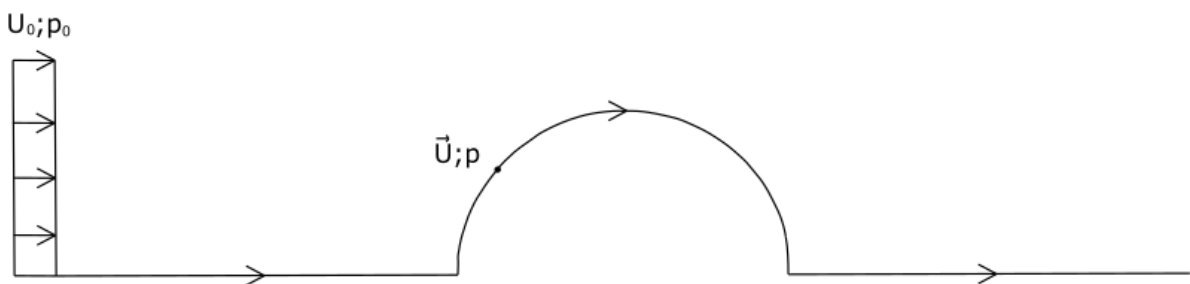


Figura B. 1 – Escoamento potencial em torno de um cilindro.

$$P_0 + \rho \frac{U_0^2}{2} = P + \rho \frac{U^2}{2} \quad (\text{B.3})$$

$$(P - P_0) = \frac{\rho}{2} (U_0^2 - U^2) \quad (\text{B.4})$$

A equação B.4 ainda pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\Delta P}{\frac{\rho U_0^2}{2}} = 1 - \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \quad (\text{B.5})$$

A equação acima está na forma paramétrica e representa a reação entre a diferença de pressão e a parcela de carga cinética do fluido em um ponto.

A velocidade, U , pode ser obtida da função potencial, ϕ .

$$\vec{U} = \nabla \phi$$

$$\begin{cases} U_r = \frac{\partial \phi}{\partial r} = U_0 \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \cos \theta \\ U_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = -\frac{U_0}{r} \left(r + \frac{R^2}{r} \right) \sin \theta = -U_0 \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \sin \theta \end{cases}$$

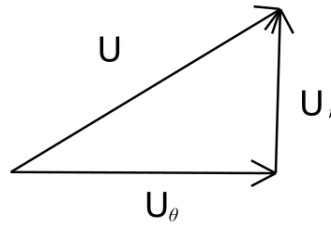


Figura B. 2 – Decomposição do vetor velocidade.

$$\begin{aligned} U &= \vec{U}_r + \vec{U}_\theta \\ U^2 &= U_r^2 + U_\theta^2 \end{aligned}$$

Então, a expressão do campo de pressão fica:

$$\frac{\Delta P}{\frac{\rho U_0^2}{2}} = 1 - \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 = 1 - \left(\frac{U_r^2 + U_\theta^2}{U_0^2} \right) \quad (\text{B.6})$$

$$\frac{\frac{\Delta P}{PU_0^2}}{2} = 1 - \frac{U_0^2 \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \cos^2 \theta + U_0^2 \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) \frac{\sin^2 \theta}{R}}{U_0^2} \quad (\text{B.7})$$

$$\frac{\frac{\Delta P}{PU_0^2}}{2} = 1 - \left[\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right)^2 \cos^2 \theta + \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right)^2 \sin^2 \theta \right] \quad (\text{B.8})$$

A expressão B.8 pode ser plotada para a vizinhança de um cilindro, fazendo $r=R$.

$$\left. \frac{\frac{\Delta P}{PU_0^2}}{2} \right|_{r=R} = 1 - 4 \sin^2 \theta \quad (\text{B.9})$$

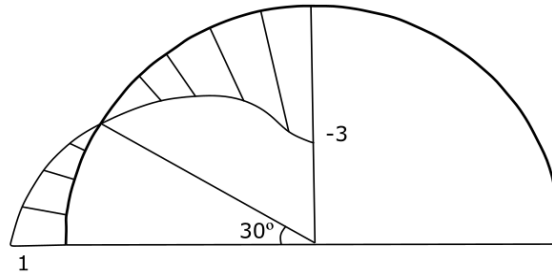


Figura B. 3 – Distribuição do campo de pressão em torno do cilindro.

onde:

$$1 - 4 \sin^2 \theta = 0$$

$$\sin^2 \theta = \frac{1}{4}$$

$$\sin \theta = \frac{1}{2} \rightarrow \theta = 30^\circ$$

Para calcular a força resultante no cilindro basta integrar as pressões no contorno do cilindro.

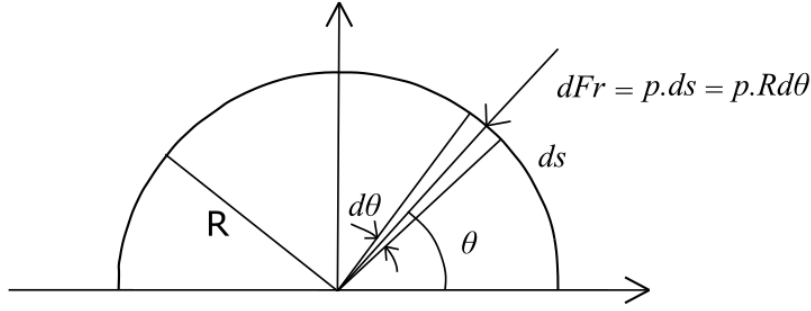


Figura B. 4 – Discretização do cilindro.

Para se obter a força resultante na direção horizontal basta multiplicar a força por $\cos \theta$.

$$F = \oint_s dF_r \cos \theta = \int_{\theta} p R \cos \theta d\theta = R \int_{\theta} p \cos \theta d\theta$$

Considerando que a pressão de referência é zero, então:

$$F = R \frac{\rho U_0^2}{2} \int_0^{2\pi} \left\{ 1 - \left[\left(1 - \frac{R^2}{R^2} \right) \cos^2 \theta + \left(1 + \frac{R^2}{R^2} \right) \sin^2 \theta \right] \right\} \cos \theta d\theta$$

$$F = R \frac{\rho U_0^2}{2} \int_0^{2\pi} (1 - \sin^2 \theta) \cos \theta d\theta$$

$$F = R \frac{\rho U_0^2}{2} \left(\int_0^{2\pi} \cos \theta d\theta - 2 \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta \cos \theta d\theta \right)$$

$$F = R \frac{\rho U_0^2}{2} \left(\cancel{\sin \theta} \Big|_0^{2\pi} - 2 \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta \cos \theta d\theta \right)$$

$$F = R \rho U^2 \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta \cos \theta d\theta$$

$$F = R \rho U^2 \frac{1}{3} \sin^3 \theta \Big|_0^{2\pi}$$

$$F = 0$$

Portanto, no escoamento potencial uniforme a força resultante sobre o corpo é nula.

ANEXO C

Modelagem do escoamento laminar a um número de Reynolds de 40

Geometria:

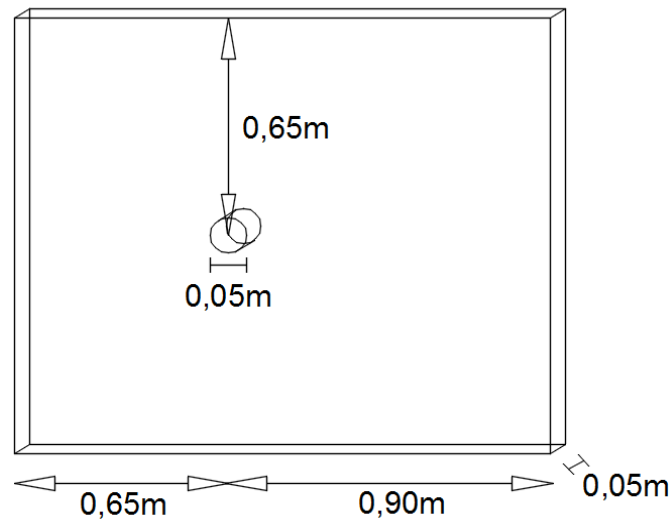


Figura C. 1 – Dimensões do domínio

Malha:

Method: Tetrahedrons

Size Function: Curvature

Max Face Size: 9,6079e-2 m

Defeature Size: 4,804e-4 m

Growth Rate: Default (1,20)

Min Size: Default (9,6079e-4 m)

Max Tet Size: Default (0,192160 m)

Curvature Normal Angle: Default (18,0°)

Smoothing: Medium

Inflation:

Inflation Option: Smooth Transition

Transition Ratio: Default (0,272)

Maximum Layers: 15

Growth Rate: 1,2

Condições de contorno:

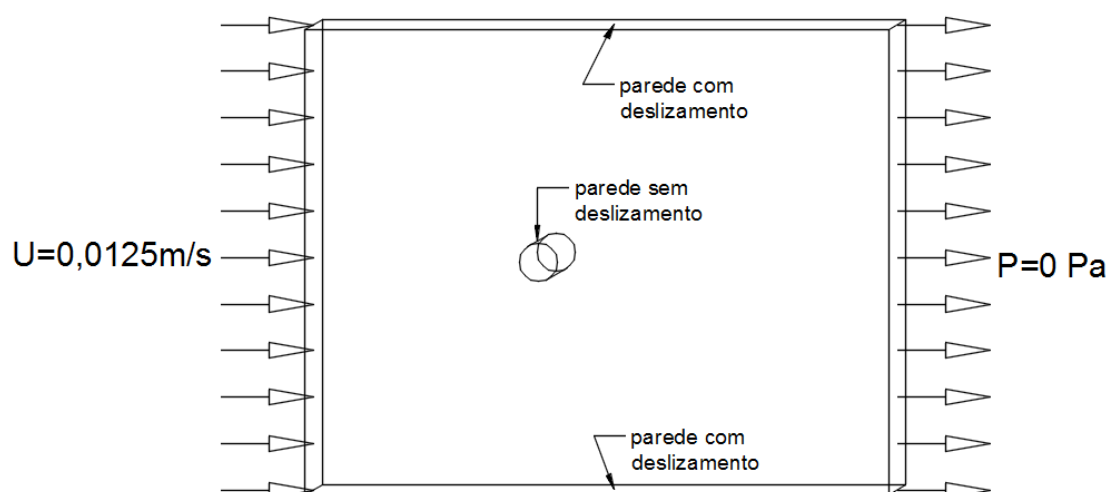


Figura C. 2 – Condições de contorno adotadas

Parâmetros físicos

Temperatura (°C)	25
ρ (kg/m ³)	1,184
μ (kg/ms)	$1,849 \times 10^{-5}$

ANEXO D

Tabela 9 – Variação do coeficiente de pressão, C_p , na superfície do cilindro.

β	C_p	β	C_p
0°/360°	1,176840	180°	-0,638488
10°	1,104340	190°	-0,649822
20°	0,883690	200°	-0,680418
30°	0,543717	210°	-0,726401
40°	0,137100	220°	-0,785659
50°	-0,270773	230°	-0,858878
60°	-0,632311	240°	-0,946199
70°	-0,906416	250°	-1,037770
80°	-1,071010	260°	-1,113010
90°	-1,063740	270°	-1,075970
100°	-1,108640	280°	-1,083110
110°	-1,038160	290°	-0,913198
120°	-0,948967	300°	-0,634265
130°	-0,861434	310°	-0,269456
140°	-0,786103	320°	0,138964
150°	-0,725574	330°	0,534469
160°	-0,679256	340°	0,865829
170°	-0,648834	350°	1,092660